THÈSES N° 30

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE BESANÇON

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

(MENTION SCIENCES)

par

M. Aloys DUPERREX

PREMIÈRE THESE : **Etude de l'eau dans les sols organiques et minéraux à l'aide de *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder » et de mesures physiques.**

DEUXIEME THESE : **Propositions données par la Faculté.**

Soutenues le 13 mai 1964 devant la commission d'examen.

MM. A. TRONCHET ..... *Président.*

A. QUANTIN .....
Mlle G. LEGRAND ..... } *Examinateurs.*
M. L. DESHUSSES .....

THÈSES N° 30

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE BESANÇON

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

(MENTION SCIENCES)

par

M. Aloys DUPERREX

PREMIÈRE THESE : **Etude de l'eau dans les sols organiques et minéraux à l'aide de *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder » et de mesures physiques.**

DEUXIEME THESE : **Propositions données par la Faculté.**

Soutenues le 13 mai 1964 devant la commission d'examen.

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN

MM. A. TRONCHET ..... *Président.*

A. QUANTIN .....
Mlle G. LEGRAND ..... *Examinateurs.*
M. L. DESHUSSES .....

UNIVERSITE DE BESANÇON

FACULTE DES SCIENCES

Doyen honoraire : M. GLANGEAUD.

Professeurs honoraires : MM. BAILLAUD R., TOURNEUX, TRILLAT, VINCENSINI.

Maître de Conférences honoraire : M. GRANIER.

Doyen : M. JACQUEMAIN, Chimie Appliquée.

Assesseur : M. MESNAGE, Chronométrie.

Professeurs : MM. TRONCHET, Botanique
CHATELET, Mathématiques
PERROT, Chimie Générale
DREYFUSS, Géologie - Minéralogie
THEOBALD, Paléontologie et Géologie stratigraphique
CROISOT, Méthodes mathématiques de la Physique
DELHAYE, Astronomie
QUANTIN, Botanique
CHALEAT, Mécanique Appliquée
RIPPLINGER, Physiologie Animale
NAHON, Mécanique Générale
BERNARD, Chimie - Physique
RIGAL, Calcul Numérique
Mme ROZIS, Physique
THIEBAUT, Géologie - Minéralogie.

Professeurs sans chaire : MM. DEVIN, Chimie Générale.
POTIER, Physique des Solides
GOMOT, Zoologie.

Maîtres de Conférences : MM. VALLEE, Mathématiques Appliquées
VIENOT, Physique
MOTCHANE, Electronique
REAL, Zoologie
GOUARNE, Mathématiques
Mlle LEGRAND, Botanique
THEOBALD, Physique P.C.B. - S.P.C.N.
REMOND, Chargé d'Enseignement de la Maîtrise de Conférences de Chronométrie.

Conseiller administratif universitaire : M. LAMBERT.

ÉTUDE DE L'EAU DANS LES SOLS ORGANIQUES ET MINÉRAUX A L'AIDE DE *COLEUS BLUMEI* Benth. " Golden Bedder " ET DE MESURES PHYSIQUES

REMERCIEMENTS

J'adresse à Monsieur le Professeur A. TRONCHET, Directeur de l'Institut et du jardin botanique de Besançon, l'expression de ma respectueuse gratitude et mes remerciements les plus sincères pour l'attention qu'il a voulu porter à l'exécution de mon travail et pour avoir accepté de diriger ma thèse.

Ma reconnaissance va également à Monsieur L. DESHUSSES, Directeur du Laboratoire de chimie agricole de Genève, qui n'a cessé de m'encourager tout au long de ce travail.

J'exprime en outre mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur R. HEIM, Membre de l'Institut, Directeur du Museum d'Histoire Naturelle, à Paris, pour toutes les démarches qu'il a entreprises à mon intention, ainsi qu'à Monsieur le Professeur R. COMBES, qui a bien voulu présenter à l'Académie des Sciences les Notes résumant plusieurs de mes résultats.

Je sais gré à Monsieur le Professeur F. CHODAT, Directeur de l'Institut de Botanique de Genève, pour son appui et à Monsieur M. STROUN, Chargé de cours à l'Université de Genève pour ses conseils.

SOMMAIRE

Introduction et limites du sujet 4
Description et origine du matériel expérimental 6
I. — Etude physico-chimique des sols 10
II. — Etude hydrique des sols 18
III. — Mesure physiologique du point de flétrissement 37
IV. — Influence de certains facteurs sur le point de flétrissement 43
V. — Influence du régime hydrique sur la croissance 55
VI. — Conditions de la turgescence 59
VII. — Eau dans les terres par rapport au volume 72

INTRODUCTION ET LIMITES DU SUJET

L'eau, dont l'utilité pour la vie et la croissance des plantes est de première importance, se divise en deux parts fort différentes mais étroitement liées l'une à l'autre.

Il y a l'eau du milieu, intéressant les écologistes et les agronomes, qui se situe au voisinage immédiat de chaque plante, et l'eau des tissus vivants des végétaux rattachée à la physiologie.

Dans le cadre de notre travail, c'est le premier de ces deux aspects de l'eau, celui concernant les rapports entre le sol, l'eau et la plante qui a principalement retenu notre attention. L'eau étant considérée surtout comme le véhicule indispensable apportant aux plantes et faisant circuler dans leur organisme les différents éléments minéraux permettant leur développement et non comme un facteur influençant plus ou moins profondément leur morphologie.

Les problèmes touchant la teneur en eau des organes végétaux ont été peu abordés dans ces recherches. Ils ont fait seulement l'objet de quelques mesures nécessaires pour appuyer certaines expériences directement en rapport avec l'eau du sol.

A la suite des publications de BRIGGS (1897), LEBEDEFF (1928) et KRAMER (1949) on a l'habitude de répartir sous quatre formes l'eau contenue dans les sols (eau de gravité, eau capillaire absorbable, eau capillaire non-absorbable et eau hygroscopique). A l'aide de ces indications, on fixe ensuite les principales constantes hydriques d'un sol qui sont : la *capacité de rétention totale*, la *capacité au champ* ou *field capacity* dont l'importance a été révélée par VEIHMEYER et HENDRICKSON (1931) et le *point de flétrissement* ou *wilting coefficient* établi par BRIGGS et SHANTZ (1912).

Actuellement, il existe diverses méthodes permettant d'évaluer avec plus ou moins de précision les proportions de chacune des formes d'eau du sol et d'indiquer la quantité d'eau utile pour les plantes contenue dans une terre.

Certaines méthodes font appel à un matériel classique, comme les pompes à vide (BOUYOUCOS, 1929 ; COLMAN, 1947), les centrifugeuses fonctionnant à 1 000 G (BRIGGS et Mc LANE, 1907 ; LEBEDEFF, 1927) ou à

(1) Ce travail a été présenté comme thèse de doctorat d'Université à la Faculté des Sciences de Besançon. Cette thèse a été soutenue le 13 mai 1964. Ce mémoire constitue une version plus condensée que le texte original.

des plantes-tests (HENDRICKSON et VEIHMEYER, 1945). D'autres procédés sont en revanche beaucoup moins accessibles ; c'est le cas, par exemple, des sondes à neutrons (méthode proposée notamment par KNIGHT et WRIGHT, 1954).

Partant de ces bases essentielles nous nous sommes proposés de comparer le comportement des sols minéraux avec celui des sols organiques, vis-à-vis de l'eau et des différentes modalités du point de flétrissement, en nous astreignant à mettre en œuvre un matériel et une plante-test standard à la portée de chaque laboratoire spécialisé.

Les sols organiques, à part les tourbes et les tourbières qui ont fait l'objet de certaines mesures hydriques, ont été constamment laissés à l'écart, bien qu'ils jouent un grand rôle dans plusieurs types d'associations végétales et en horticulture.

D'emblée, nous avons constaté que la plupart des méthodes utilisées pour les terres minérales étaient difficilement applicables aux sols organiques. Nous avons dû surmonter les obstacles posés par la fragilité de la structure, le pH et l'hygrophobie de nos milieux, afin de pouvoir mettre en valeur le rôle capital de la matière organique vis-à-vis de la rétention de l'eau et de la fertilité.

Non seulement, nous avons dû modifier les méthodes hydriques en usage en pédologie, mais nous avons dû également nous astreindre à travailler avec nos sols bruts au lieu de réduire la dimension des fragments à 2 millimètres comme c'est la règle pour les terres minérales.

Les méthodes mécaniques et même électriques permettant de mesurer la capacité de rétention totale et la capacité au champ de l'eau dans les terres, sont insuffisantes pour fixer le point de flétrissement, surtout quand le sol contient une certaine quantité de sels en solution. Seule la mesure avec une plante-test est vraiment valable. Aucune des plantes-tests proposées pour les sols minéraux (*Helianthus*, *Citrus* et *Solanum lycopersicum* : BRIGGS et SHANTZ, 1912 ; TAYLOR et FURR, 1937 ; ESSELEN, 1937 ; HENDRICKSON et VEIHMEYER, 1945 ; BREAZEALE et Mc GEORGES, 1949) ne peut être appliquée à l'ensemble des terres organiques.

Nous avons résolu le problème en utilisant *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder », dont le maniement est beaucoup plus souple, et mesurer ainsi non seulement le point de flétrissement de nos différents sols, mais aussi le phénomène contraire, c'est-à-dire le point de turgescence.

Ensuite, nous avons cherché à associer mesures physiques et mesures biologiques pour connaître les réserves d'eau utile des principaux types de milieux organiques et minéraux afin d'estimer la valeur des pluies, des arrosages ou des irrigations pour chacun d'eux.

DESCRIPTION ET ORIGINE DU MATERIEL EXPERIMENTAL

I. Choix des sols

Les expériences sont effectuées avec 11 sols représentant les types les plus caractéristiques, soit : 5 sols purement organiques, dont un milieu semi-artificiel que nous utilisons depuis plusieurs années pour nos essais, 3 sols essentiellement minéraux et 3 sols composés en proportions variables de matière organique et de matière minérale.

Tel qu'il est réalisé, ce choix présente des sols riches ou pauvres en matière organique, très aérés ou compacts, fortement acides ou calcaires, d'une densité extrêmement faible ou très élevée et, surtout, ayant apparemment un pouvoir de rétention pour l'eau très divers.

Dans ce travail, les termes de *sol* et de *terre* sont pris indifféremment dans le même sens (Plaisance et Cailleux, 1958), celui de support pour la végétation.

a) Sols organiques :

La tourbe. — Elle représente le sol des régions pluvieuses ou richement pourvues en eau de ruissellement et elle est considérée comme ayant le plus fort pouvoir de rétention à l'égard de l'eau de tous les sols. De toutes les qualités connues, c'est la tourbe oligotrophe jaune ou brun clair, appelée communément « tourbe de Hollande » provenant de l'horizon superficiel des hauts-marais qui est utilisée pour nos recherches.

La sapinette. — C'est la litière des forêts résineuses, à sous-bois plus ou moins riche en éricacées, reposant sur un sol acide. Elle est tirée de l'horizon superficiel, AoL (Duchaufour, 1960) et se présente comme une sorte de *Mor*, ou humus brut composé uniquement d'éléments grossiers, notamment des débris de mousse et des aiguilles de conifères. Elle a la particularité d'avoir une acidité élevée et on lui attribue un fort pouvoir de rétention pour l'eau.

Terreau d'un an. — Il constitue la litière formée de feuilles partiellement décomposées qui couvre, dès l'automne et le printemps le sol plus ou moins calcaire des forêts de hêtres, de chênes et de charmes. On peut l'assimiler au *Mull forestier*, ou humus doux, à cause de ses gros éléments organiques réunis en agrégats. Il est imprégné d'une riche microflore et il se minéralise rapidement.

Terreau de deux ans. — Il s'agit de la couche de matière organique à demi ou presque totalement décomposée que l'on trouve sur le sol généralement calcaire des forêts feuillues, là où les feuilles se sont amassées en quantité considérable dans les vieux troncs évidés. On peut le considérer comme un *Mul forestier dégradé*. Il est d'une teinte noire, dépourvu d'agrégats organiques importants, fortement humifié et a tendance à devenir pâteux lorsqu'il est mouillé.

Mélange standard. — Ce milieu, basé sur le principe du compost anglais John Innes (Lawrence et Newell, 1950), contient des matières de composition bien déterminées et il est destiné à remplacer la variété infinie et compliquée des terres horticoles.

Le mélange standard que nous avons créé (Deshusses et Duperrex, 1951, 1952) est préparé avec les deux matières suivantes :

1. Une tourbe fortement dégradée, riche en acides humiques, d'une acidité modérée, fortement granulée et assurant un drainage rapide ainsi qu'une large aération. Cette tourbe, utilisée après un séchage à l'air, reste stable pendant longtemps. Elle provient des tourbières de Boswil, dans le canton d'Argovie (Suisse), mais on la trouve dans les couches profondes de toutes les tourbières.

2. De la tourbe de Hollande (décrite plus haut), dont le pouvoir absorbant à l'égard de l'eau complète la rétention insuffisante exercée par les granules draineurs de la tourbe dégradée.

Le mélange standard, dont les rapports entre l'eau, l'air et la matière solide sont les plus favorables à la végétation, est obtenu en mélangeant 2 parties de tourbe granulée et 1 partie de tourbe de Hollande (fibreuse).

b) Sols minéraux :

TERRE FRANCHE. — Elle représente le type classique d'une terre arable. Elle appartient au groupe des sols bruns calcaires, argilo-siliceux, typique de la zone des prairies et des grandes cultures. Elle résulte du mélange des horizons A_1 et A_2, selon DUCHAUFOUR (1960), du domaine du laboratoire (Châtelaine-Genève).

TERRE GRAVELEUSE. — C'est la terre caillouteuse calcaire, riche en gravier roulé de toutes dimensions, constituant les glariers (1). Elle est tirée des vastes amas graveleux accumulés sur les rives et aux débouchés de certaines rivières.

SABLE. — Milieu peu colloïdal à éléments fins, calcaires, caractéristique au bord des eaux et dans les déserts. Selon la quantité d'eau qui l'imprègne, le sol sableux est envahi soit par une végétation paludéenne, soit par des associations de xérophytes.

LIMON. — Il est le type du sol très fin, riche en matières colloïdales. Composé essentiellement de particules dont la dimension est inférieure à 0,05 mm., il constitue une terre assez compacte où l'eau et l'air sont censés circuler avec difficulté.

c) Sols organiques et minéraux :

TERRE DE BRUYÈRE. — Elle se rencontre dans les landes de plaine à éricacées, peuplées parfois de pins, de bouleaux et de genêts, sur sol sableux siliceux. Elle comprend les horizons de A_0 à A_C, ce qui fait qu'elle contient de la matière organique, due au feutrage des racines, aux débris des organes aériens de bruyère, fougères, graminées et des éléments minéraux sous forme de sable provenant de l'horizon inférieur.

MÉLANGE HORTICOLE. — C'est un milieu composé artificiellement. Il contient environ, en volumes, 50 % de terre franche, 45 % de tourbe de Hollande et 5 % de sable. Il permet de faire une comparaison avec la terre de bruyère, à laquelle il ressemble par son aspect physique général, mais en diffère foncièrement par sa teneur en calcaire.

II. Choix d'une plante-test

Lorsqu'on s'occupe de déterminer le point de flétrissement des sols agricoles, selon le principe établi par BRIGGS et SHANTZ (1912), les plantes-tests classiques sont convenables : par exemple les Citrus étudiés par ESSELEN (1937), TAYLOR et FURR (1937), le tournesol nain (*Helianthus annuus nanus*) proposé avec succès par HENDRICKSON et VEIHMEYER (1945), VEIHMEYER et HENDRICKSON (1949), ou encore la tomate par BREAZEALE et Mc GEORGE (1949).

(1) Nom donné en Suisse aux dépôts de terre caillouteuse se trouvant généralement à l'embouchure d'un torrent ou d'un fleuve. (DUPERREX, 1960).

En revanche, dès qu'il s'agit de fixer le point de flétrissement des sols humiques spéciaux comme le « *Mor* », ou litière d'humus brut très acide des sols siliceux, ainsi que la tourbe mésotrophe riche en débris de sphagnum, on se heurte à des obstacles importants.

Les *Citrus* sont d'une croissance lente et ils sont difficiles à suivre, le tournesol ne supporte pas l'acidité élevée des litières de certaines forêts et des tourbes dont le pH varie entre 3 et 4,2 De plus, le tournesol, ainsi que la tomate se prêtent mal à la culture hivernale en serre ; leur végétation est fortement ralentie et étiolée pendant les mois sombres, alors qu'elle est parfois démesurée en été, de sorte qu'il faut disposer d'une forte lumière d'appoint ou, sinon, renoncer aux mesures d'hiver.

Après quelques essais effectués avec différentes plantes, dont la balsamine (*Impatiens balsamina*), nous nous sommes arrêtés au cultivar « Golden Bedder » de *Coleus blumei* Benth. (DUPERREX, 1962 [1] ; 1962 [4]).

Ce *Coleus*, dont d'autres cultivars sont utilisés depuis peu pour l'étude de certains phénomènes auxiniques (NITSCH, 1961), de transpiration foliaire (WALLACE et STOUT, 1962), s'est révélé d'une souplesse remarquable, par rapport aux plantes-tests utilisées jusqu'ici pour les mesures des points de flétrissement et de turgescence.

Coleus blumei Benth « Golden Bedder » :

Le genre *Coleus* comprend un peu plus de 150 espèces paléotropicales ; il appartient à la famille des *Labiées* et à la sous-famille des *Ocimoïdées*.

Coleus blumei Benth., originaire de l'Indonésie, a donné naissance à un grand nombre de cultivars sélectionnés pour leurs feuilles marquées de belles marbrures rouges et jaunes, vertes et blanches, oranges et brunes.

Coleus blumei Benth. « Golden Bedder » est une plante annuelle en plein air, comme la plupart des cultivars de *C. blumei*, mais elle peut vivre plusieurs années dans les serres. Elle se caractérise par des tiges atteignant 60 cm, à section carrée, portant des feuilles opposées, d'un beau vert doré, cordiformes et dentées. Les fleurs violettes, peu importantes, sont réunies en longues inflorescences apparaissant en journées longues, lorsque les plantes atteignent leur taille maximum. Le cultivar « Golden Bedder » se distingue de ses congénères par la largeur de ses feuilles dont la teinte dorée s'amplifie avec l'intensité de l'insolation.

Les avantages de cette plante-test sont les suivants :

1. — Elle se développe dans les conditions climatiques les plus diverses, soleil brillant ou pénombre, sécheresse ou humidité excessives. Elle s'accommode de tous les sols, purement organiques ou essentiellement minéraux, calcaires ou non, riches en sels ou très pauvres, d'un pH de 3,5 à 8,5. En outre, elle pousse indifféremment dans le limon le

plus fin comme dans la litière de feuilles à peine décomposées et grossières, dans la tourbe acide ou le gravier calcaire, ou encore dans le sable siliceux.

2. — La plante se multiplie aisément par boutures, ce qui apporte un supplément de sécurité puisqu'on travaille avec un clone, donc avec un matériel rigoureusement homogène du point de vue morphologique et héréditaire.

3. — Le point de flétrissement est facile à observer sur le *Coleus*. Les feuilles bien étagées, opposées deux à deux à angle droit sont sensibles au flétrissement et s'abaissent graduellement à partir de l'étage inférieur au fur et à mesure que la terre se dessèche.

4. — Les feuilles flétries reprennent sans peine leur turgescence, même après une assez longue période de flétrissement alors que toutes les feuilles, de la base au sommet de la tige, pendent et n'ont plus la moindre résistance. Aspergées d'eau à plusieurs reprises sur le feuillage, les feuilles reprennent en quelques heures leur parfaite turgescence. Il en est de même quand la plante est arrosée. Une plante de ce cultivar peut être soumise de nombreuses fois au flétrissement et à la restauration hydrique sans que les feuilles jaunissent et tombent.

Méthode de multiplication :

La préparation des *Coleus blumei* « Golden Bedder » destinés aux mesures du point de flétrissement, ou de la turgescence, ne demande pas d'installations compliquées; l'essentiel est de disposer d'une serre chauffable ou d'un local équipé pour la culture.

Pour ce qui nous concerne, nous avons entrepris notre travail de la façon suivante : les premières boutures reçues ont servi à préparer les pieds mères; ceux-ci ont été mis en pot dans une terre légère, et placés dans des bacs à irrigation automatique. Les *Coleus* se cultivent très bien en solution nutritive, ce qui est un avantage pour un laboratoire. Après quelques mois de végétation, les plantes ont émis suffisamment de jeunes pousses pour qu'on puisse prélever des boutures.

Chaque sommet de tige est coupé sous le 4^{e} entre-nœud et les deux feuilles du 4^{e} nœud sont sectionnées à la base. La bouture ainsi prête est enfoncée à 1 cm. de profondeur dans le milieu sableux. Les terrines sont placées à la lumière, à 18° $\pm$ 3° et 20 jours plus tard, les boutures sont enracinées; elles sont devenues des plantes utilisables pour la mesure du point de flétrissement.

Chapitre I

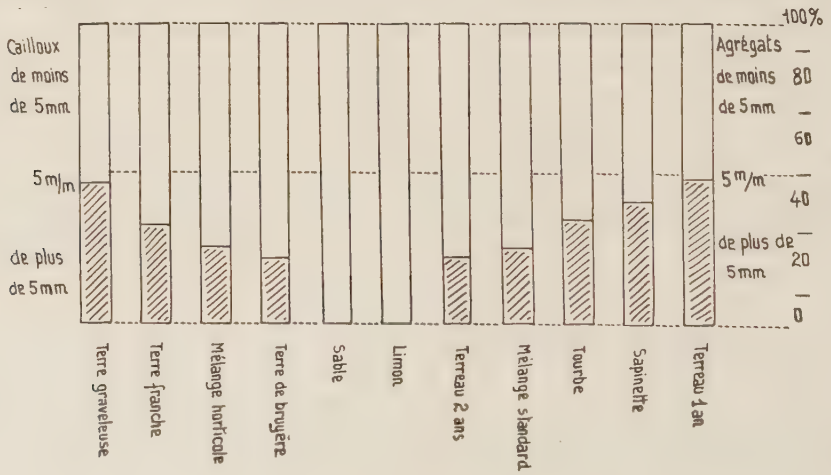
ETUDE PHYSICO - CHIMIQUE DES SOLS

I. Classement granulométrique

Dans le cadre de notre travail, les proportions des différents éléments grossiers, minéraux et organiques, entrant dans la composition d'un sol, nous paraissent avoir une grande importance ; les gros éléments facilitent incontestablement la circulation de l'eau et de l'air dans les terres. Au cours de ces dernières années, BERTHLAHMY (1952), COILE (1953), FRANZMEIER, WHITESIDE et ERICKSON (1961), REINHART (1961), puis GRAS et MONNIER (1962) ont fait état du rôle joué par la grosseur des cailloux, notamment à propos de l'eau disponible du sol.

En outre, nous avons souvent constaté que l'augmentation des gros éléments minéraux dans un sol s'accompagne généralement d'un appauvrissement de la végétation. Au contraire, dans les terres à matière organique, la grandeur des agrégats, feuilles et débris ligneux, correspond à un signe de fertilité ; les sols organiques les plus grossiers assurant la meilleure croissance à la plupart des plantes.

Partant de ces considérations, nous avons été amenés à fonder notre analyse granulométrique sur un critère un peu différent de celui de la méthode internationale et ceci en établissant un classement des éléments grossiers afin de bien montrer leur composition.



A la suite de plusieurs essais, le tamis à mailles laissant un espace de 5 mm s'est avéré plus significatif que le classique tamis de 2 mm pour départager les sols organiques et minéraux. Nous nous sommes également astreints à expérimenter les sols organiques sans les modifier, tels qu'ils se présentent dans la nature. Sur ce point, COMBEAU (1960) semble être de cet avis en signalant que les analyses exécutées sur des terres où les matières organiques sont mises à part, ne permettent pas de déterminer le rôle précis de certains facteurs. SALTER et HAWORTH (1961) proposent aussi d'utiliser les sols bruts.

Résultats des tamisages à 5 et 2 mm.

	(% en poids)			
	au-dessus de :		en-dessous de :	
	5 mm.	2 mm.	5 mm.	2 mm.
Terres organiques :				
Terreau 1 an	48	71	52	29
Sapinette	41	62	59	38
Tourbe	35	65	65	35
Mél. standard	26	57	74	43
Terreau 2 ans	22,5	51,5	77,5	48,5
Terres minérales (et T. mixtes) :				
Terre graveleuse	47	59	53	41
T. franche	33	52,5	77	47,5
Mél. horticole	16	45	84	16
T. de bruyère	12	23	88	77
Sable	0,5	1,5	99,5	98,5
Limon	0,3	1,5	99,7	98,5

Analyse granulométrique des gros éléments (% en poids)

	1 mm.	1-2 mm.	2-5 mm.	5-10 mm.	10-25 mm.	25 mm.
Terres organiques :						
Terreau 1 an	18	11	23	20	15	13
Sapinette	26	12	21	16	13	12
Tourbe	20	15	30	30	5	0
Mél. standard	28	15	31	21	5	0
Terreau 2 ans	35	13,5	29	12,5	7,5	2,5
T. minérales (et mixtes) :						
Terre graveleuse	31	10	12	10	17	20
T. franche	32	15,5	29,5	10	11	2
Mél. horticole	35,5	18,5	29	9	6	2
T. de bruyère	66	11	11	8	4	0
Sable	96,5	2	1	0,5	0	0
Limon	97,7	1	1	0,3	0	0

II. Densité

La détermination du poids spécifique des terres est doublement utile. Elle permet de ramener les résultats expérimentaux concernant les rapports entre le sol, l'eau et les plantes, à un volume, une surface, et non uniquement à des poids comme c'est souvent l'habitude.

Ensuite, c'est en partant de la densité réelle qu'on détermine la porosité totale d'un sol. Le volume occupé dans une terre par les espaces vides joue un rôle important ; pour une large part il fixe le pouvoir de rétention de l'eau et, par la masse d'air qu'il met à la disposition des racines, il agit directement sur la croissance des plantes.

Pour les sols, il y a lieu de distinguer deux types de densité : la *densité apparente* et la *densité réelle* ou absolue.

a) Densités apparentes (Da) :

C'est le poids d'un dm^3 de terre séchée à l'air (Burger, 1922 ; Kopecky, 1927 ; Ringelmann et Bourdelle, 1931 ; Vomocil, 1957) dont la structure naturelle a été respectée autant que possible au cours du prélèvement de l'échantillon.

Ajoutons, qu'en dehors de certains sols, comme les terres minérales grumeleuses où le prélèvement modifie inévitablement la densité, le brassage n'intervient pratiquement pas. Les sols minéraux à éléments fins, les sables et les limons, reprennent facilement leur volume initial après une manipulation ; quant aux sols organiques, leur élasticité s'oppose à un tassage sérieux.

La gamme des densités apparentes propres aux différentes terres est très étagée : elle permet également de distinguer les trois catégories de sols étudiés dans ce travail :

Sols minéraux :	Terre graveleuse	1,940
	Sable	1,452
	Limon	1,250
	Terre franche	0,752
Sols minéraux et organiques :	Terre de bruyère	0,604
	Terreau de 2 ans	0,520
	Mélange horticole	0,468
Sols organiques :	Terreau 1 an	0,248
	Mélange standard	0,248
	Sapinette	0,148
	Tourbe	0,056

b) Densités réelles ou absolues (Dr) :

Il s'agit du poids spécifique réel correspondant à la masse des constituants solides de la terre, en faisant abstraction de l'eau et de l'air. Bien que plusieurs méthodes électroniques aient été essayées depuis peu de temps (Coffman, 1960 ; Pelegrin et Buscarlet, 1960 ; Henry, 1962),

nous préférons mesurer les densités réelles des terres selon la méthode internationale (American Society for Testing materials, 1950 ; PLAISANCE et VAN MAREL, 1960), faisant appel au pycnomètre.

Densités réelles :

a) *Sols organiques :*		b) *Sols organiques et minéraux :*		c) *Sols minéraux :*	
Tourbe	1,18	Mélange horticole ...	1,83	Terre franche	2,30
Mélange standard	1,20	Terre de bruyère	2,06	T. graveleuse	2,52
Sapinette	1,55			Sable	2,64
Terreau 1 an	1,75			Limon	2,70
Terreau 2 ans	1,78				

III. Porosité

Elle représente la somme des espaces vides d'un sol et elle est définie généralement sous le nom de porosité totale ; elle se divise en macroporosité et en microporosité qui correspondent, l'une au volume des pores non capillaires, l'autre à l'ensemble des pores capillaires. Ces deux parties de la porosité sont étroitement liées à la rétention de l'eau dans les sols. De ce fait, elles sont étudiées plus loin dans les chapitres consacrés à la mesure de l'eau des terres.

La porosité totale est exprimée en % du volume total du sol. Elle est obtenue en comparant les densités réelles et apparentes (TORSTENSEN et ERICKSON, 1936 ; KUMMER et COOPER, 1941 ; PAGE, 1947 ; RUSSELL, 1949).

Porosités totales :

a) *Sols organiques :*		b) *Sols organiques et minéraux :*		c) *Sols minéraux :*	
Tourbe	95,28	Mélange horticole ...	85,42	Terre franche	67,39
Sapinette	90,48	Terreau 2 ans	70,80	Limon	53,78
Terreau 1 an	85,85	Terre de bruyère ..	70,68	Sable	45,11
Mélange standard ...	79,37			Terre graveleuse	23,21

Les chiffres de la porosité totale ont un grand intérêt, car ils mettent en relief les espaces laissés libres à l'intérieur d'une terre. Les sols organiques se caractérisent par une aération beaucoup plus importante que celle des sols minéraux. Le terreau de deux ans, d'origine organique, mais dont les particules sont très dégradées, présente une porosité intermédiaire entre celle des terres organiques et celle des terres minérales, tandis que le mélange horticole contenant de la tourbe a une porosité assez élevée.

Il est en outre intéressant de remarquer que le classement des terres d'après la porosité totale, tel qu'il apparaît ci-dessus, est à très peu de chose près, exactement le même que celui des densités apparentes. En revanche, le classement des terres par un tamisage à 5 mm et, dans une moindre mesure, l'analyse granulométrique, ne révèlent pratiquement aucune différence profonde entre les sols organiques et minéraux.

IV. pH

Bien que les mesures du pH n'aient pas un rapport direct avec l'étude de l'eau dans les sols, elles sont nécessaires pour caractériser l'extrême diversité des terres étudiées et, surtout, pour signaler la très forte acidité de certaines terres organiques ou contenant de la matière organique. L'acidité élevée des sols étant un obstacle important à surmonter pour effectuer des mesures du point de flétrissement avec les plantes-tests ordinaires, ce facteur joue ainsi un rôle de premier plan.

Méthode de mesure :

Les mesures sont faites à 20° C avec un pH-mètre, type E 196 de Metrohm (Herisau-Suisse), muni d'une électrode de pénétration en verre.

Les résultats indiqués sur le tableau montrent la gamme étendue des pH des terres expérimentales. Celle-ci va de 3,97 avec la terre de bruyère à 8,77 avec le sable.

Sable	8,77
Limon	8,05
Terre graveleuse	8,05
Terreau 1 an	7,75
Terre franche	7,65
Terreau 2 ans	7,15
Mélange horticole	6,94
Mélange standard	4,80
Sapinette	4,80
Tourbe	4,00
Terre de bruyère	3,97

V. Analyses chimiques

Toutes les terres ont été analysées de la même façon en utilisant les méthodes classiques :

L'*azote total* (N), d'après la méthode KJELDAHL, par désagrégation avec H_2SO_4 et distillation de l'ammoniaque (DUCHAUFOUR, 1960).

Le *phosphore* (P_2O_5) et le *potassium* (K_2O) assimilables ont été extraits par l'eau chargée de CO_2 et dosés selon les méthodes utilisées en Suisse (DIRKS et SCHEFFER, 1933) : le phospore par le procédé au molybdate d'ammonium et chlorure d'étain, par colorimétrie (photocolorimètre de LANGE) et le potassium d'après une solution standard de chlorure de K au moyen du photomètre à flamme (EEL, Type A).

Le *calcaire total* avec le calcimètre BERNARD et le *calcaire actif* selon la méthode Drouineau mentionnée par DUCHAUFOUR (1960).

Analyses chimiques des sols

	% $CaCO_3$		mgr. pour 100 gr. de terre sèche		
	actif	total	N	P_2O_5	K_2O
Tourbe de Hollande	—	0	1040	46,6	27,1
Mélange standard	—	0	1970	7,9	17,9
Sapinette	—	0	1220	16,5	39,4
Terreau 1 an	—	5,6	1160	24,37	50,3
Terreau 2 ans	—	6,5	1010	7,6	36,9
Mélange horticole	—	18,4	460	19,5	27,1
Terre de bruyère	—	0	370	4,9	5,6
Terre franche	5,5	13,1	630	3,4	17,2
Sable	4,5	39,2	50	0,1	1,0
Terre graveleuse	3	21	150	0,1	1,0
Limon	6,2	16,8	100	0,1	0,9

Les résultats permettent de constater deux points intéressants : Les sols organiques apparaissent nettement plus riches en macro-éléments essentiels que les terres minérales. En outre, ils ne contiennent pas de calcium, sauf en ce qui concerne les terreaux qui en ont un peu et le mélange horticole qui en possède une certaine proportion à cause du sable qui entre dans sa composition.

Dans les deux terreaux et le mélange horticole, le calcaire actif n'est pas dosé, car la méthode habituelle de Drouineau ne peut pas être appliquée aux terres contenant de la matière organique.

VI. Sels solubles

Ils représentent la totalité des sels contenus dans l'eau saturant les terres.

Les solutions servant aux dosages sont obtenues en filtrant les sols imbibés d'eau un peu au-dessus de la rétention totale, ceci pour avoir une terre pâteuse s'égouttant facilement. Les solutions sont évaporées au bain-marie, puis desséchées à 105° pendant 12 heures. Les extraits secs sont ensuite pesés. Ils ne sont pas calcinés et contiennent par conséquent diverses substances organiques.

Sels solubles ou extraits secs en gr. par litre de solution

Limon	0,30
Terre graveleuse	0,35
Sable	0,36
Mélange standard	0,60
Sapinette	0,70
Tourbe de Hollande	0,77
Terre franche	1,13
Mélange horticole	1,18

Terre de bruyère	1,18
Terreau 1 an	1,42
Terreau 2 ans	1,74

Dans la réalité, lorsque les terres sont moins saturées d'eau, la quantité de sels solubles de chaque terre se trouve automatiquement plus élevée.

La totalité des extraits secs n'est pas un indice précis de la fertilité, puisque ceux-ci ne sont pas constitués uniquement de sels minéraux utiles aux plantes. Ces sels interviennent dans la nutrition minérale en réglant la pression osmotique des solutions contenues dans les terres.

VII. Matières organiques totales

Les matières organiques de nos terres, par leur structure grossière aérée, et leur fort pouvoir d'absorption à l'égard de l'eau par rapport à leur poids, sont particulièrement intéressantes.

Chaque terre, pesée dans une capsule de quartz, est passée à l'étuve pendant 24 heures à 105° pour être débarrassée de son eau hygroscopique. Ensuite, les capsules sont mises dans le four électrique réglé à 500° C jusqu'à la combustion totale.

Une fois retirées du four et refroidies, les cendres contenues dans les capsules sont arrosées avec une solution saturée de carbonate d'ammoniaque afin de transformer le CaO, issu de la calcination, en $CaCO_3$ tel qu'il se trouvait auparavant dans les terres. Le carbonate d'ammoniaque est évaporé par un nouveau passage à 105° pendant 12 heures.

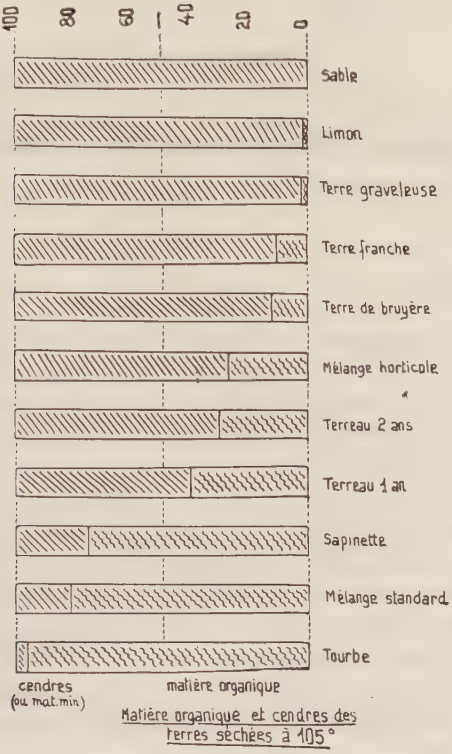
Les résultats sont calculés en pour cent par rapport au poids des terres séchées à l'étuve.

Matières organiques totales

Terres	% Mat. organiques
Tourbe	96,87
Mélange standard	81,33
Sapinette	75,11
Terreau 1 an	40,15
Terreau 2 ans	30,20
Mélange horticole	27,57
Terre de bruyère	12,31
Terre franche	10,00
Terre graveleuse	1,48
Limon	1,38
Sable	0,37

Le classement des terres par ordre du pourcentage en matières organiques totales a beaucoup de ressemblance avec celui établi en tenant compte de la densité apparente.

Le classement des sols, en tenant compte des matières organiques totales, mérite d'être retenu car il demeure pratiquement le même



durant toute la suite de ce travail. On le retrouve notamment dans les différents résultats des mesures hydriques et des points de flétrissement obtenus avec le *Coleus blumei*, « Golden Bedder » !

Chapitre II

ETUDE HYDRIQUE DES SOLS

I. Rétention totale

C'est la quantité d'eau maximum qu'un sol, reposant sur un sous-sol bien drainé, peut contenir lorsque la plus grande partie de l'air est remplacée par de l'eau, on la désigne aussi sous le nom de capacité de rétention (DEMOLON, 1948 ; DUCHAUFOUR, 1960) ou de capacité pour l'eau (PLAISANCE et CAYEUX, 1960).

La rétention totale correspond assez approximativement à la porosité capillaire des terres (RODE, 1956 ; ROE, 1950). Théoriquement, c'est l'eau qui reste, après un certain égouttage, dans un sol copieusement arrosé. Elle s'exprime presque toujours en % du poids de la terre sèche.

Bien que la mesure de la rétention totale ait une valeur discutable du fait qu'elle dépende de conditions arbitraires, variables selon les auteurs (KOPECKY, 1927 ; PLAISANCE et CAYEUX, 1958 ; RICHARDS et WADLEIGH, 1952), elle reste indispensable pour apprécier le volume d'eau total qu'un sol peut emmagasiner.

Pour effectuer nos mesures, nous avons adopté une méthode qui dérive de celle de KOPECKY (1927).

Elle consiste à mettre la terre dans un tamis composé d'un cylindre de plexiglas de 7,5 cm de diamètre et de 5,5 cm de hauteur. La base est fermée par une toile métallique dont les mailles sont espacées de 0,25 mm (l'appareil repose sur une couche de papier filtre).

Les tamis pleins de terre sont immergés dans l'eau jusqu'à la moitié de leur hauteur pendant 24 heures. Après ce temps, les terres minérales sont fortement imbibées. En revanche, les sols organiques doivent être mouillés en surface avec une pipette, éventuellement malaxés avec de l'eau, faute de quoi ils ne parviennent pas à se mouiller par imbibition.

Après ce temps, les tamis sont égouttés, en étant tenus inclinés de façon à ce que l'excès d'eau s'écoule librement. Nous attendons jusqu'à ce que le filet d'eau s'arrête, puis nous posons les tamis sur du papier filtre pour enlever l'eau prise dans les mailles du treillis. Le tamis plein de terre saturée d'eau est ensuite pesé et la rétention totale est obtenue par le calcul :

$$\text{Rétention totale} = \frac{Ts - Th}{Ts} 100$$

Ts désignant le poids de la terre séchée à 105° et Th, le poids de la terre humide.

Comme les temps d'égouttage cités dans la littérature varient entre 2 et 24 heures, nous avons effectué des séries de mesures portant sur différentes durées.

Après la première pesée, les tamis contenant les différentes terres humides ont été recouverts d'une plaque de verre, pour éviter les pertes d'eau par évaporation, et placés sous cloche. Ils ont été ensuite pesés à nouveau après les délais d'attente suivants : 1, 2, 3 1/2, 6, 8 et 30 heures. Le pourcentage d'eau retenu par les terres après ces différentes durées a été calculé chaque fois avec la même formule.

Rétention totale après drainage de différentes durées
(eau exprimée en % par rapport à la matière sèche)

Terres	au départ	délais d'attente en heures 1	2	3 1/2	6	8	30
Tourbe	1113	1046	1000	995	980	949	899
Sapinette	387	353	339	326	314	309	254
Mélange standard	360	341	338	314	313	311	301
Terreau 1 an	197	179	175	168	167	165	156
Terreau 2 ans	120	113	112	106	105	104	98
Mélange horticole	119	109	103	100	97	94	88
Terre franche	73	70	67	65	63	62	57
Terre de bruyère	69	66	62	60	59	58	54
Limon	49	44	44	42	41	40	36
Sable	27	26	26	25	25	24	23
Terre graveleuse	18	17	16	16	15	15	12

II. Point de ressuyage

Le point de ressuyage est obtenu lorsque l'eau remplissant les plus grands pores de la terre abondamment trempée par les pluies ou les arrosages, s'est écoulée. En principe, il est atteint 24 à 48 heures après l'humidification complète des sols, pour autant que ceux-ci aient un drainage fonctionnant normalement.

HALLAIRE (1956) en donne la définition suivante : la capacité de rétention au champ, ou point de ressuyage, est la valeur de l'humidité que l'on peut observer au moment où cesse le drainage, autrement dit, où les forces capillaires sont suffisantes pour s'opposer à l'entraînement de l'eau par gravité. Cette capacité est très variable selon la nature des sols.

Le point de ressuyage, ou *Field capacity*, que l'on détermine en mesurant l'humidité équivalente, ou *moisture equivalent*, a été défini par BRIGGS et Mc LANE (1907), BRIGGS et SHANTZ (1912), puis il a été repris d'une façon particulière par VEIHMEYER et HENDRICKSON (1949).

La mesure du point de ressuyage est l'une des deux constantes permettant de déterminer la quantité d'eau utile des terres, c'est-à-dire celle qui est à la disposition des plantes ; elle est une mesure de la microporosité ou porosité capillaire. Cette dernière est égale au volume des pores les plus plus petits occupés par l'eau dans le sol lorsque ce dernier est complètement ressuyé.

La différence entre la microporosité et la porosité totale donne la

macroporosité. Elle correspond au volume occupé par l'eau de gravité. Quand le sol est au point de ressuyage, la macroporosité devient un indice de l'aération des terres.

L'énergie avec laquelle l'eau est retenue par le sol augmente avec la dessication. Elle est généralement désignée sous le nom de potentiel capillaire et on l'exprime en atmosphères au moyen du symbole pF. Ce dernier correspond au logarithme de cette énergie mesurée en cm d'eau. Ainsi, le point de ressuyage est égal à pF = 1,8, soit 0,05 atm. (SCHOFIELD, 1935).

Pour mesurer le point de ressuyage, BRIGGS et Mc LANE ont suggéré d'utiliser la force centrifuge. Leur méthode consiste à soumettre les terres à une force égale à 1 000 fois la gravitation terrestre, ce qui correspond à environ 1 atmosphère (pF = 3). Or, il se trouve que les résultats obtenus de cette manière sont généralement trop faibles ; l'essorage étant trop efficace. Aussi, bien que nous ayons mesuré le point de ressuyage de nos terres expérimentales en les soumettant, par acquis de conscience, à une force centrifuge de 1 000 G, nous préférons réserver cette méthode, en modifiant la durée de l'opération, pour la mesure du point de flétrissement. Ce dernier se caractérisant par un dessèchement plus poussé des terres.

En revanche, lorsqu'on expose les terres saturées d'eau, c'est-à-dire au point de rétention totale, à une succion par dépression (à la trompe), ou par compression (à l'air comprimé), de l'ordre de 1/3 d'atmosphère, on obtient des résultats qui paraissent plus près de la réalité.

En résumé, les mesures courantes du point de ressuyage se font soit par centrifugation, soit par succion ; en ce qui nous concerne, nous avons expérimenté ces deux types de mesures et avec DUCHAUFOUR (1960), nous estimons que la pression d'une atmosphère est trop élevée pour déterminer l'humidité équivalente, autrement dit le point de ressuyage ou Field capacity.

a) Point de ressuyage à 1.000 G. :

Les terres sont placées dans une centrifugeuse spéciale tournant à 2 440 tours par minute pendant 30 minutes, ce qui correspond à 1 000 × la gravitation terrestre, soit environ 1 atmosphère (LEBEDEFF, 1927 ; VEIHMEYER, OSERKOWSKY et TESTER, 1928 ; BOUYOUCOS, 1935 ; AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS, 1948).

L'appareil que nous utilisons (Centrifuge moisture-équivalent-test « MSE ») comprend un plateau tournant de 31 cm. de diamètre, à larges rebords, se fermant avec un couvercle à vis. Les terres sont mises dans des boîtes carrées dont le fond est constitué par un treillis métallique recouvert d'un papier filtre. Les boîtes ont 5 cm. de côté et 2 cm. de profondeur; elles sont remplies jusqu'à la moitié de leur hauteur, ce qui donne une couche de terre à essorer de 1 cm. Ensuite, les boîtes sont immergées pendant 24 heures dans l'eau, sauf pour les terres organiques sèches qui sont d'abord malaxées avec de l'eau avant d'être mises dans les boîtes.

Après la centrifugation, les boîtes contenant la terre sont pesées puis séchées à l'étuve pendant 12 heures à 105°. Après déduction des tares le point de ressuyage est calculé par rapport à la terre sèche à 105°.

Point de ressuyage (Field capacity) à 1.000 G après 30'

Terres	% d'eau par rapport à la terre séchée à 105°
Tourbe	277
Sapinette	112
Mélange standard	123
Terreau 1 an	89
Terreau 2 ans	70
Mélange horticole	43
Terre franche	24
Terre de bruyère	23
Limon	15
Sable	3
Terre graveleuse	4

b) Point de ressuyage à 1/3 atm. :

Il se détermine d'après les méthodes de RICHARDS et WEAVER (1944), ainsi que de COLMAN (1947), auxquelles nous avons apporté quelques modifications d'ordre pratique..

Les terres sont mises dans des bagues de laiton de 2,5 cm de diamètre, ou 5 cm s'il s'agit de terres contenant des éléments très grossiers, et 2,5 cm de hauteur ; ces bagues reposent sur des plaquettes de verre carrées. Elles sont remplies avec les sols à examiner, puis immergées dans l'eau pendant 24 heures, les sols organiques étant malaxés par avance avec de l'eau avant le remplissage des bagues.

Après ce temps d'imbibition, les bagues pleines de terre se trouvant à la rétention totale sont retirées de l'eau pour être essorées. Nous disposons de deux types d'appareils pour mesurer le point de ressuyage à 1/3 d'atmosphère : l'un est basé sur la succion par dépression, l'autre par compression. Nous avons expérimenté ces deux procédés.

Mesure par dépression : Elle est fondée sur le principe décrit par COLMAN (1947).

Cette méthode de mesure comprend l'appareillage suivant : une plaque creuse de porcelaine, poreuse seulement à sa face supérieure, dont l'intérieur est placé sous dépression. Cette plaque est reliée à un manomètre à mercure et à un régulateur de pression. Le vide, créé par une trompe à eau est réglé et maintenu à 1/3 d'atmosphère. Les bagues pleines de terre imbibées d'eau, recouvertes d'une plaquette de verre sont posées sur la plaque poreuse qui exerce une succion continue. Après une durée d'essorage déterminée, allant de 1 à 3 heures, les bagues pleines de terre humide, exposées à l'essorage par séries de 12, sont ensuite retournées sur les plaquettes de verre, pesées puis séchées pendant 12 heures à 105° et pesées à nouveau. Le calcul du pourcentage d'eau au point de ressuyage (Field capacity) se fait par rapport à la terre sèche.

Jusqu'ici nous nous sommes astreints à étudier nos terres telles qu'elles se trouvent dans leur milieu naturel en ne modifiant aucunement la structure pour chacune des opérations analytiques. Mais comme le point de ressuyage joue un grand rôle pour le calcul de l'eau utile aux plantes, nous avons tenu à vérifier l'effet d'une granulation artificielle. Nous avons donc exécuté une seconde série d'essais en ramenant

nos sols à une granulation ne dépassant pas 2 mm, comme on a encore tendance à le proposer.

Les sols organiques ont été entièrement broyés à la machine pour réduire les gros éléments à 2 mm et les terres minérales ont été séparées des cailloux d'une grosseur supérieure à 2 mm.

Pour ce qui concerne les sols organiques, les résultats montrent clairement que la rétention de l'eau au point de ressuyage est nettement différente selon qu'il s'agit des sols naturels ou de mêmes sols broyés à 2 mm. Chez les sols mixtes, ou essentiellement minéraux, on constate également une grande différence entre les sols bruts et les sols réduits à 2 mm par broyage et tamisage.

Nous constatons que, lorqu'on modifie la granulation d'une terre naturelle, spécialement lorsque celle-ci contient des matières organiques, on bouleverse sérieusement la structure et on se trouve alors en face d'un nouveau milieu de culture dont les caractères hydriques sont profondément différents. Il est alors bien difficile de tenter de le ramener par le calcul à son état primitif en établissant des coefficients de correction tenant compte à la fois du volume des éléments grossiers et du rôle de ceux-ci à l'égard de l'eau du sol à la disposition des plantes.

Les mesures du point de ressuyage ont été faites en exposant chaque fois les terres à trois durées d'essorage : 1, 2 et 3 heures.

D'une manière générale, on constate que les terres dont l'état granulométrique a été volontairement réduit retiennent davantage d'eau. Leur point de ressuyage est toujours plus élevé.

Essorage des terres à 1/3 atm. par dépression
(eau exprimée en % par rapport à la terre séchée à 105°)

Terres	Brutes			Ramenées à 2 mm. par broyage ou tamisage		
	1 h.	2 h.	3 heures	1 h.	2 h.	3 heures
Tourbe	411	309	314	557	462	386
Sapinette	183	165	165	218	195	189
Mélange standard	148	141	137	319	182	170
Terreau 1 an	126	120	119	139	119	118
Terreau 2 ans	80	71	70	89	81	79
Mélange horticole	55	49	48	68	67	62
Terre franche	31	30	28	47	40	39
Terre de bruyère	32	28	24	49	41	37
Limon	32	30	29		idem	
Sable	6,1	4,4	3,6		idem	
Terre graveleuse	18,7	9,9	8.5	22	16	15

Mesures par compression à 1/3 d'atmosphère.

Cette méthode, plus récente que la précédente, présente un intérêt particulier, car elle fait appel à un matériel standardisé construit spéciale-

ment pour les mesures hydriques. Ce matériel est toutefois encore coûteux (Pressure Plate Extractor Cat. 1200, Soil Moisture Equipement).

Une sorte de marmite à pression est accouplée à une source d'air comprimé. A l'intérieur du récipient, des crochets permettent de placer plusieurs étages de plaques poreuses semblables à celles utilisées pour les mesures par dépression ; chaque plaque communique avec l'extérieur par une canalisation en caoutchouc destinée à expulser l'eau d'essorage.

Les terres imbibées d'eau à la rétention totale sont mises dans des bagues en laiton de 2,5 cm de diamètre et 2,5 cm de hauteur, selon le même processus que pour la méthode précédente.

Les résultats obtenus avec cette méthode sont à peu de chose près semblables à ceux qui proviennent des mesures par dépression.

Essorage des terres brutes à 1/3 atm. par compression
(eau exprimée en % par rapport à la terre séchée à 105°)

Terres	% d'eau après 1 heure
Tourbe	440
Sapinette	182
Mélange standard	170
Terreau 1 an	109
Terreau 2 ans	84
Mélange horticole (ancien)	52
(nouveau)	28
Terre franche (ancienne)	33
(nouvelle)	24
Terre de bruyère	33
Limon	22
Sable	6,7
Terre graveleuse	6,3

Cette série de mesures comprend un mélange horticole et une terre franche supplémentaires. Ces terres, dont le point de ressuyage est un peu plus bas, ont fait l'objet de certains essais culturaux concernant les modalités du point de flétrissement.

III. Mesures physiques du point de flétrissement

A partir du moment où une plante se fane et ne reprend plus sa turgescence lorsqu'on la place dans une atmosphère saturée d'humidité, la terre prospectée par les racines se trouve au stade du point de flétrissement, ou « wilting coefficient » (BRIGGS et SHANTZ, 1912), ou « permanent wilting » (HENDRICKSON et VEIHMEYER, 1929). A ce stade, le potentiel capillaire correspond à une force de rétention qui est de l'ordre de 16 atmosphères (EDLEFSEN et ANDERSON, 1943), soit : pF = 4,2.

La différence entre le point de ressuyage et le point de flétrissement, permet d'évaluer la quantité d'eau utile d'un sol.

A notre avis, les seules mesures valables du point de flétrissement sont celles que l'on obtient avec une plante-test, surtout lorsqu'il s'agit de terres plus ou moins riches en sels minéraux. Toutefois, les mesures physiques, quand elles sont interprétées avec beaucoup de précautions, ont un avantage. Elles permettent d'avoir rapidement un résultat, généralement en moins d'une journée, tandis que la méthode biologique avec une plante-test demande au moins 15-20 jours d'attente.

La mesure physique classique du point de flétrissement se fait avec une presse à membrane permettant d'extraire l'eau du sol sous une pression de 16 atmosphères.

En effectuant nos recherches, nous avons constaté qu'on pouvait aussi mesurer convenablement le point de flétrissement en utilisant d'une certaine façon la centrigugeuse fournissant une force de 1 000 G.

a) Détermination du point de flétrissement avec la presse à membrane :

Cette méthode, proposée notamment par RICHARD (1941), est basée sur le principe même utilisé pour extraire l'eau des terres sous pression de 1/3 d'atmosphère.

L'appareil est constitué par deux grosses plaques d'acier de 37 cm de diamètre et 1,5 cm d'épaisseur serrant un large anneau d'acier de 1,5 cm de hauteur. Les terres imbibées d'eau à la rétention totale sont mises dans des bagues de caoutchouc de 5 cm de diamètre et l'extraction de l'eau se fait à travers une membrane de cellophane. Les plaques sont serrées avec 8 gros écrous et la pression, fournie par une bouteille d'air comprimé, est réglée à 16 atmosphères au moyen d'un détendeur spécial pendant la durée de la mesure, soit pendant 32 heures.

Cet appareil, connu sous le nom de « Pressure Membrane extractor » (Soil Moisture Equipement), nous manquait encore au moment où nous devions faire nos mesures, mais nous avons bénéficié des services du laboratoire de physique des sols, dirigé par M. A. COMBEAU, du Centre scientifique et technique (ORSTOM) de Bondy. M. COMBEAU a bien voulu se charger des mesures du point de flétrissement à pF = 4,2, ce dont nous lui sommes très reconnaissant. Les difficultés de mouillage présentées par nos terres organiques l'ont obligé à faire plusieurs séries de 4 essais dans des bagues jusqu'à ce qu'il obtienne des résultats peu variables. Les chiffres qui suivent proviennent donc de son laboratoire.

Pour des raisons purement pratiques, nous avons limité les mesures du point de flétrissement avec la presse à membrane à quelques types de notre gamme de terres expérimentales.

Mesures du point de flétrissement avec la presse à membrane
(eau exprimée en % par rapport à la terre séchée à 105°)

Terres	% d'eau à pF = 4,2
Tourbe	168
Mélange standard	89
Terreau 2 ans	49
Terre franche	20
Limon	3,7

En comparant les chiffres obtenus avec la presse à membrane et ceux, ci-après, résultant d'un essorage spécial à 1 000 G, on constate que les pourcentages d'eau au point de flétrissement varient assez peu d'une méthode à l'autre pour une même terre.

b) Détermination du point de flétrissement avec la centrifugeuse :

En étudiant les modalités de la détermination du point de ressuyage, ou Field capacity, de nos terres avec la centrifugeuse réglée à 1 000 G, nous avons constaté qu'en soumettant les terres saturées d'eau à cette force centrifuge pendant 2 heures sans utiliser le couvercle ou disque qui sert à fermer le plateau rotatif, on obtient des conditions qui amènent les terres à un état très proche du point de flétrissement obtenu avec une plante-test.

Les chiffres obtenus avec cette méthode indiquent en fait la limite inférieure de l'eau absorbable des terres. Comparés avec ceux du point de ressuyage ils permettent donc de connaître la quantité maximum d'eau utile qu'une terre peut contenir. La détermination du point de flétrissement avec la centrifugeuse a l'avantage d'être rapide mais, comme la méthode précédente, elle ne tient pas compte de la pression osmotique des solutions salines qui peuvent modifier la quantité d'eau utile des sols. Ce problème est repris plus loin à propos des mesures biologiques effectuées avec *Coleus blumei* « Golden Bedder » comme plante-test.

Les résultats sont exprimés comme d'ordinaire en % d'eau par rapport à la terre séchée à 105°.

Mesures du point de flétrissement avec la centrifugeuse

Terres	*Plateau ouvert* méthode adoptée % d'eau	*Plateau fermé* % d'eau
Tourbe	136	230
Sapinette	87	98
Mélange standard	98	109
Terreau 1 an	56	73
Terreau 2 ans	48	63
Mélange horticole	36	41

Terre franche	19	21
Terre de bruyère	10	18
Limon	4,0	14
Sable	0,6	2,1
Terre graveleuse	2,8	4,0

D'après BRIGGS et SHANTZ (1912), on peut déterminer le point de flétrissement à partir du point de ressuyage en divisant ce dernier par le coefficient 1,84.

Pour vérifier si cette hypothèse est applicable à tous les types de sols, nous avons établi le rapport entre le point de flétrissement à 1 000 G et le point de ressuyage à 1/3 d'atmosphère de chaque sol.

En comparant les coefficients que nous avons trouvés avec celui de BRIGGS et SHANTZ, il ressort que seules quelques terres, spécialement la terre franche, donnent un chiffre qui se rapproche de 1,84. Les autres sols, tels que la tourbe, le limon, ont un coefficient très différent et il semble délicat de fixer un indice théorique propre au calcul du point de flétrissement de tous les types de terre. RICHARDS et WEAVER (1943) ont trouvé aussi des coefficients dépassant souvent 1,84.

IV. Eau hygroscopique

L'eau capillaire imprégnant les terres séchées à l'air est sujette à des variations plus ou moins considérables dépendant directement de l'humidité atmosphérique.

En ce qui nous concerne, l'eau hygroscopique correspond à la fraction d'eau restant dans les terres séchées dans un local où règnent une température de 20° ± 3° et une humidité relative de 55 % ± 5 %. Cette fraction d'eau est retenue dans les terres avec une énergie dépassant 50 atmosphères, ce qui donne un pF de 4,7 à 7.

Eau hygroscopique

Terres	% d'eau par rapport à la terre séchée à 105°
Tourbe	32,8
Mélange standard	14,7
Sapinette	11,2
Terreau 1 an	11,2
Terreau 2 ans	8,6
Mélange horticole	5,0
Terre franche	3,5
Terre de bruyère	2,8
Limon	0,74
Terre graveleuse	0,56
Sable	0,25

D'après DUCHAUFOUR (1960), en multipliant la valeur de l'eau hygroscopique par 1.5 on devrait obtenir le point de flétrissement. Or,

d'après nos mesures et dans les conditions expérimentales que nous avons appliquées, ce coefficient paraît beaucoup trop bas. Il faudrait, à notre avis, le remplacer par le coefficient 5, ou éventuellement 5,5, pour obtenir un résultat qui se rapprocherait alors beaucoup du point de flétrissement mesuré, soit avec la centrifugeuse à 1 000 G pendant deux heures, soit avec *Coleus blumei* « Golden Bedder » comme plante-test.

V. Résumé des mesures physiques de l'eau des sols

Les résultats qui suivent groupent les mesures hydriques (rétention totale après 30 heures, point de ressuyage à 1/3 d'atmosphère par compression, point de flétrissement à 1 000 G) à partir desquelles on peut déduire les trois formes principales de l'eau contenue dans un sol à la rétention totale, ainsi que les deux types de porosité.

Caractéristiques hydriques des sols
(exprimées en % des terres séchées à 105°)

Terres	Rétention totale	Point de ressuyage (microp.)	Point de flétrissement	eau de gravité (macrop.)	eau utile	eau inutilisable totale
Tourbe	899	440	136	459	304	595
Sapinette	254	182	87	72	95	159
Mélange standard ..	301	170	98	131	72	229
Terreau 1 an	156	109	56	47	53	103
Terreau 2 ans	98	84	48	14	36	62
Mélange horticole ...	88	52	36	36	16	72
Terre franche	57	33	19	24	14	43
Terre de bruyère ..	54	33	11	21	22	32
Limon	36	22	4	14	18	18
Sable	23	7	0,6	16	6,4	16,6
Terre graveleuse	12	6	2,8	6	3,2	8,8

a) L'*eau de gravité* s'obtient en faisant la différence entre la rétention totale et le point de ressuyage. Elle correspond à la macroporosité.

b) L'*eau utile* pour les plantes est déterminée par la différence entre le point de ressuyage et le point de flétrissement.

c) L'*eau inutilisable totale* comprend l'eau perdue par gravité et l'eau au point de flétrissement.

La microporosité est constituée par l'eau utile et l'eau inutilisable remplissant les pores fins.

Les caractéristiques hydriques calculées par rapport au poids des terres séchées à 105° permettent de fixer les limites de l'eau utile des sols pour les plantes. La limite supérieure est représentée par le point de ressuyage, au-delà de cette limite les terres s'engorgent et deviennent asphyxiantes pour de nombreux végétaux, tandis que la limite inférieure

est marquée par le point de flétrissement, en-dessous duquel la plupart des plantes se dessèchent et meurent. En faisant des dosages réguliers de l'eau d'une terre, au cours des saisons, on peut ainsi établir facilement une courbe donnant l'évolution de l'état hydrique d'un sol par rapport à ces deux limites (DUPERREX, 1963 [3] ; HUSSON, 1963). Le même travail peut être exécuté sur un profil du sol et porté en graphique.

VI. Rapports entre la matière solide, l'eau et l'air

Pour mettre en évidence les rapports existant entre les matières solides, l'eau et l'air de chaque terre, nous avons traduit les proportions occupées par ces trois éléments dans une terre à la rétention totale sous la forme de graphiques (types de graphiques déjà utilisés par QUANTIN, 1947).

Sur le premier tableau la matière solide, l'eau et l'air sont exprimés par rapport au poids de la terre séchée à 105°.

Les proportions de chaque élément sont calculées d'après les mesures de la rétention totale effectuées sur tamis (p. 30) en rapportant le poids de la terre sèche à celui de la terre saturée d'eau.

Rapport en poids % entre la matière solide, l'eau et l'air

Terres	après 1 heure			après 30 heures		
	Matière solide	eau	air	Matière solide	eau	air
Tourbe	8,3	86,2	5,5	8,3	74	17,7
Sapinette	20,6	72,5	6,5	20,6	52,1	27,3
Mélange standard ...	21,8	74,1	4,1	21,8	65,4	12,8
Terreau 1 an	33,7	60,2	6,1	33,7	52,5	13,8
Mélange horticole ...	45,6	49,7	4,7	45,6	40,2	14,2
Terreau 2 ans	45,3	51,4	3,3	45,3	44,6	10,1
Terre franche	57,9	40,7	1,4	57,9	33,4	8,7
Terre de bruyère ...	58,9	38,8	2,3	58,9	31,7	9,4
Limon	67,2	29,7	3,1	67,2	24,2	8,6
Sable	78,5	20,8	0,7	78,5	18,6	2,9
Terre graveleuse ...	84,3	13,9	1,8	84,3	10,5	5,2

Le second tableau montre les proportions occupées par la matière solide, l'eau et l'air en pour cent du volume.

Les calculs ont été effectués à partir des mêmes chiffres que pour le tableau précédent, c'est-à-dire avec ceux résultant de la rétention totale sur tamis. mais en tenant compte de la densité apparente.

La capacité en air des terres est connue en comparant les pertes d'eau après 1 et 30 heures de drainage à la masse du volume total. Le volume laissé libre par l'écoulement de l'eau étant, à peu de chose près, entièrement remplacé par de l'air.

Rapport en volumes % entre la matière solide, l'eau et l'air

Terres	après 1 heure			après 30 heures		
	Matière solide	eau	air	Matière solide	eau	air
Tourbe	61,6	36,1	2,3	61,6	31,0	7,4
Sapinette	65,5	31,4	3,1	65,5	22,6	11,9
Mélange standard ...	57,0	41,2	1,8	57,0	36,7	6,3
Terreau 1 an	67,2	30,0	2,8	67,2	26,0	6,8
Mélange horticole ..	64,2	32,8	3,0	64,2	26,4	9,4
Terreau 2 ans	61,3	36,4	2,3	61,3	31,5	7,2
Terre franche	60,6	37,8	1,6	60,6	31,0	8,4
Terre de bruyère ...	70,9	27,3	1,8	70,9	22,3	6,8
Limon	64,0	32,7	3,3	64,0	26,8	9,2
Sable	71,6	27,4	1,0	71,6	24,1	4,3
Terre graveleuse	73,4	23,5	3,1	73,4	17,5	9,1

VII. Mesures de l'eau par résistance électrique

Nous avons effectué nos travaux selon la méthode de BOUYOUCOS et MICK en utilisant l'un des appareils construit d'après les données de ces auteurs.

Nos expériences montrent que cette méthode, étudiée jusqu'ici surtout sur des sols agricoles, présente de sérieuses lacunes et des complications en ce qui concerne plusieurs de nos terres, spécialement celles ayant une forte teneur en matière organique ou irriguées avec des solutions nutritives.

En fait, il n'est pas pas possible de déterminer l'eau des sols organiques par la méthode de la résistance électrique.

VIII. Irrigation des terres

Afin de connaître le comportement des terres en place, dans la nature ou en culture lorsqu'elles sont soumises aux chutes de pluie et aux variations du plan d'eau, nous avons examiné plusieurs systèmes d'irrigation et procédé à différentes mesures.

a) Irrigation par gravité.
b) Irrigation par capillarité.
c) Irrigation de longue durée par capillarité.
d) Evolution des profils hydriques.
e) Vérification de l'irrigation par capillarité avec des plantes de *Coleus blumei* « Golden Bedder ».

Pour effectuer ces essais, nous avons pris des tubes de plexiglas analogues à ceux utilisés par FEODOROFF (1962) pour les mesures de ressuyage par gravitation. Ces tubes sont tenus verticalement en séries

sur un support. Ils ont 24 cm de hauteur et 2,5 cm de diamètre ; leur base est fermée par une toile métallique. Ils sont remplis séparément, en effectuant un léger tassage, avec les 11 terres brutes sèches à l'air.

a) Irrigation par gravité (per descensum) :

Dans cet essai, l'apport d'eau est fait en surface ; il est sensé simuler l'action d'une pluie. Pour cela, les tubes pleins de terre sont fixés sur leur support au-dessus d'une cuve rectangulaire. L'eau est distribuée également dans chaque tube grâce à des burettes de précision ; ceci au régime d'une goutte d'eau par seconde afin d'éviter tout engorgement superficiel du sol.

En tenant compte de la surface de l'orifice des tubes, nous avons calculé la quantité d'eau qu'il faut déverser sur les terres pour obtenir l'équivalence de 2, 5, 10, 20 et 30 millimètres de pluie. Pour la surface d'un cercle de 2,5 cm de diamètre une pluie de 1 mm représente donc 0,45 cm^3 d'eau. Ensuite, nous avons mesuré la couche de terre mouillée par ces quantités d'eau.

Le cheminement de l'eau par gravitation s'effectue avec une facilité plus ou moins grande selon la perméabilité et surtout selon la mouillabilité des sols. Ce dernier facteur nous est d'emblée apparu important dans les terres organiques. Comme la plupart des sols occupés par la végétation contiennent une certaine quantité de matières organiques, il n'est pas étonnant que l'eau s'y infiltre plus ou moins profondément selon la qualité de cette matière.

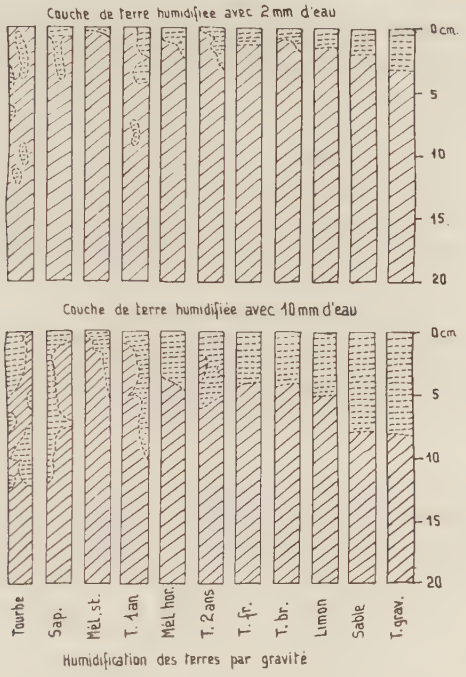
Les mesures que nous avons effectuées montrent à quel point la circulation de l'eau est différente dans les terres organiques et dans les terres minérales. Les phénomènes d'hydrophilie des sols minéraux et d'hydrophobie propres à la matière organique, déjà mis en évidence par TSCHAPEK (1957), PELISHEK, OSBORN et LETEY (1962), FEODOROFF (1962), sont particulièrement apparents dans nos mesures comparatives faites à partir de terres séchées à l'air.

Humidification des terres par gravité

(L'épaisseur de la couche de terre imbibée d'eau est exprimée en mm.)

Terres	2 mm.	5 mm.	10 mm.	20 mm.	30 mm.
Tourbe	—	—	—	—	—
Sapinette	—	—	—	—	—
Mélange standard	—	—	—	—	—
Terreau 1 an	—	—	—	—	—
Terreau 2 ans	—	—	55	80	80
Mélange horticole	13	30	41	84	128
Terre franche	12	27	41	82	115
Terre de bruyère	—	—	42	80	122
Limon	14	25	49	96	145
Sable	20	50	78	142	195
Terre graveleuse	30	55	82	152	200

L'examen des chiffres indiquant les épaisseurs des terres humidifiées avec des apports d'eau comparables à des pluies de 2 à 30 mm montre les propriétés particulières des diverses matières organiques à l'égard de l'eau.



Humidification des terres par gravité

Quand les terres organiques sont sèches, il est très difficile de les humidifier. Les substances grasses et les cires qui se trouvent encore dans les débris végétaux rendent ces sols très hydrophobes. Des apports d'eau, même d'une certaine importance, roulent en surface sous forme de gouttelettes, ou glissent dans les méats irréguliers du substratum et il apparaît rapidement des bouchons, se présentant sous la forme de chapelets de Jamin (FEODOROFF, 1962), qui s'opposent à l'humidification de la matière organique. Il est donc impossible d'enregistrer une zone humide bien déterminée.

Alors que dans une terre minérale, une pluie de 30 mm manifeste ses effets jusqu'à 100 ou 200 mm, on ne trouve, dans un sol organique, que quelques plages humides très éparses. Sur le terreau de 2 ans et la terre de bruyère, une pluie inférieure à 10 mm n'humidifie aucune couche distincte.

On comprend donc que dans ces conditions, une tourbière, ou haut-marais, desséchée par un drainage en période sans pluie, devienne superficiellement et pour longtemps un milieu xérophile. Ceci, bien que la tourbière se situe dans une région où le climat est favorable à son maintien.

b) Irrigation par capillarité (per ascensum) :

Ce procédé permet d'observer la vitesse d'irrigation et l'épaisseur de terre humidifiée par capillarité au-dessus du plan d'eau.

Nous avons utilisé pour ces mesures les mêmes tubes de plexiglas, supports et cuves, que pour les essais d'irrigation par gravitation. En revanche, le fond de la cuve contient, pour cet essai, une nappe d'eau de 1 cm de profondeur dans laquelle trempe la base des tubes remplis de terre sèche. Ce plan d'eau est contrôlé et maintenu en permanence par de fréquents ajustements. Les tubes contenant les 11 terres sont ainsi irrigués par capillarité au-dessus du même plan d'eau.

Les mesures consistent à observer la montée de l'eau dans les terres et à noter la vitesse de son ascension jusqu'à 240 mm de hauteur dans les tubes de terre. Cette norme un peu arbitraire correspond à l'épaisseur de la terre exposée habituellement aux travaux du sol et soumise aux grandes variations d'humidité.

L'ascension de l'eau par capillarité montre d'une façon particulièrement évidente le caractère hydrophobe de la matière organique sèche et son comportement à l'égard de l'humidification.

Humidification des terres par capillarité

(l'épaisseur de la couche de terre imbibée d'eau est exprimée en mm.)

Terres	Durées des ascensions						
	1 h.	6 h.	10 h.	30 h.	48 h.	100 h.	720 h. (= 1 mois)
Tourbe	5	25	40	40-90	70-100	80-130	180
Sapinette	10-20	45	55	55-85	60-100	65-110	180
Mélange standard ...	5	50	75	60-120	90-140	95-150	190
Terreau 1 an	5-10	30	40	40-75	50-85	65-90	170
Terreau 2 ans	5-10	30	40	60-80	70-75	70-90	170
Mélange horticole ...	100	150	170	215	240		
Terre franche	90	105	150	215	240		
Terre de bruyère ...	3-60	95	115	155	160	160	180
Limon	120	240					
Sable	200	240					
Terre graveleuse	105	175	190	220	240		

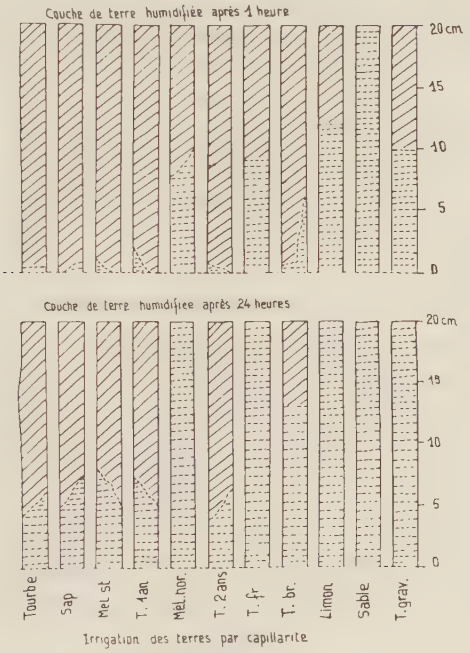
Les terres organiques sèches s'imbibent d'eau très incomplètement jusqu'à une hauteur qui n'excède pas 180-190 mm. On peut prolonger la durée de l'essai pendant 2 mois sans enregistrer de modification notable.

Dans ces sols, le plan d'eau s'élève d'abord avec beaucoup d'irrégularité puis, à une certaine hauteur, il se crée une zone de condensation qui semble arrêter toute ascension d'eau capillaire. Tout se présente comme si des amoncellements de bulles gazeuses, ou chapelets de Jamin (DUCLAUX, 1934 ; HUBER, 1956 ; FEODOROFF, 1962), obstruaient les espaces entre les agrégats de matières organiques.

Dans cette zone, les agrégats sont peu humidifiés, mais ils sont enrobés en permanence de vapeur et de gouttelettes d'eau.

Ce phénomène particulier de condensation permet de faire des constatations intéressantes :

La matière organique ne se laisse presque pas mouiller par imbibition ; elle est fortement hydrophobe. De ce fait, l'eau y circule très mal et elle s'élève difficilement jusqu'à 180 mm par capillarité, un horizon de matière organique sèche est donc un véritable barrage qui s'oppose fortement au passage de l'eau.



Irrigation des terres par capillarite

On comprend ainsi qu'une tourbière desséchée, ou tout autre formation organique d'une certaine importance, ne puisse plus s'hydrater par la base, même si elle possède un plan d'eau constamment alimenté par une nappe souterraine. En outre, le rôle protecteur des litières de matière organique sur les sols cultivés, contre la déperdition d'eau par évaporation, ne peut donc être 100 % efficace que s'il constitue une couche ayant au moins 18 cm d'épaisseur.

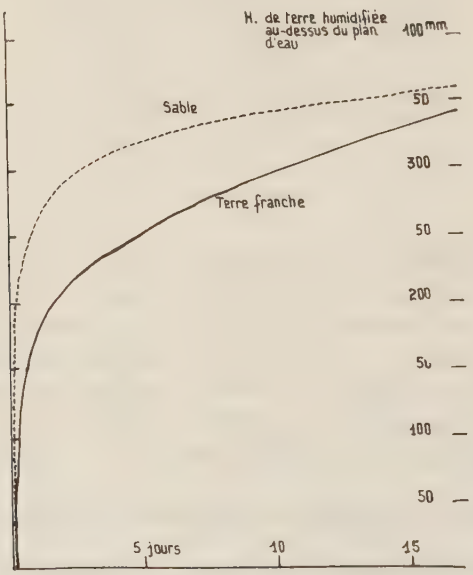
c) Irrigation de longue durée par capillarité :

Dans les précédents essais, les mesures d'irrigation des terres minérales par capillarité sont arrêtées à 240 mm par la longueur des tubes expérimentaux. Afin d'avoir des renseignements complets sur la force ascensionnelle de l'eau dans ces terres nous avons procédé à de nouvelles mesures en utilisant des colonnes de verre de plus d'un mètre de hauteur

(FEODOROFF, 1961). Ces colonnes ont été remplies avec précautions en effectuant un tassage régulier avec deux terres de caractères différents : le sable, la terre franche. Elles ont été disposées de façon à ce que leur base baigne en permanence dans un bac renfermant 1 cm d'eau. C'est-à-dire dans les mêmes conditions que pour l'essai précédent. La montée de l'eau par capillarité a ensuite été surveillée et notée journellement pendant 6 mois.

Irrigation par capillarité pendant 6 mois
(hauteurs exprimées en mm. de terre mouillée)

Durées de l'irrigation	Sable	Terre franche
1 heure	200	90
1 jour	280	180
2 jours	300	200
5 »	320	240
12 »	350	305
20 »	370	343
30 » (1 mois)	388	388
60 » (2 mois)	425	465
90 » (3 mois)	445	495
120 » (4 mois)	475	520
150 » (5 mois)	502	550
180 » (6 mois)	520	572



Irrigation des terres par capillarité

L'examen des résultats montre que l'eau s'élève d'abord très vite dans le sable puis que son ascension diminue rapidement. Dans la terre franche, la montée de l'eau est moins rapide, plus soutenue.

La circulation ascendante de l'eau dans le sable sec est de 280 mm le premier jour contre 180 mm dans la terre franche sèche. Par la suite, jusqu'à la fin du premier mois, l'eau ne monte plus que de 3,7 mm par jour dans le sable et 7,1 mm dans la terre franche. Après un mois, la couche humidifiée est de 388 mm dans le sable comme dans la terre franche.

Enfin, du troisième au sixième mois, l'eau ne franchit plus que la hauteur dérisoire de 0,8 mm par jour dans le sable, soit environ 2,3 cm par mois, et 0,9 mm dans la terre franche, soit à peu près 2,7 cm par mois.

Les deux courbes de la figure illustrent ces phénomènes.

Ces faits appellent la conclusion suivante, d'une grande importance pour les cultures et bon nombre de couvertures végétales naturelles.

Dans les terres minérales, le plan d'eau assure une humidification certaine jusqu'à 280 mm dans le sable et 180 mm dans la terre franche.

Au-delà de ces hauteurs, la montée de l'eau par capillarité est sans aucun doute beaucoup trop lente pour compenser les pertes d'eau par évapotranspiration.

e) Evolution des profils hydriques :

Afin de connaître l'état d'humidification des terres à différentes hauteurs au-dessus du plan d'eau, nous avons fait des dosages dans les colonnes après deux mois d'irrigation. Les prélèvements de terre humide ont été effectués à quatre niveaux au-dessus du plan d'eau :

1. — 30 mm au-dessus du plan d'eau. Cette zone est apparemment très mouillée dans les terres minérales et organiques.

2. — 100 mm au-dessus du plan d'eau. Dans toutes les terres, cette zone a également une apparence très humide.

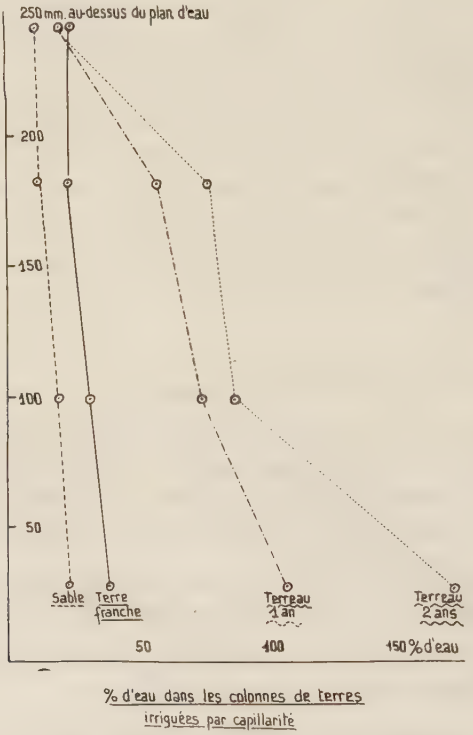
3. — 180 mm au-dessus du plan d'eau. Dans les terres minérales, cette zone paraît très humide. Elle semble partiellement mouillée chez les terres organiques ; elle représente dans ce cas la zone où se trouve l'eau de condensation imprégnant les particules organiques.

4. — 240 mm au-dessus du plan d'eau. Cette zone est bien mouillée dans toutes les terres minérales. Dans les sols organiques, cette zone est sèche. Au toucher, ces derniers semblent contenir un pourcentage d'eau hygroscopique un peu supérieur à celui des terres séchées à l'air.

En comparant les teneurs en eau du profil hydrique de chaque terre avec le point de flétrissement à 1 000 G, on constate que la zone des terres situées peu au-dessus du plan d'eau est toujours fortement saturée d'eau. A 100 et 180 mm au-dessus de l'eau, les terres organiques et minérales sont encore très humides.

En revanche, on observe un grand changement au-delà de la cote de 200 mm. A 240 mm au-dessus du plan d'eau, les sols organiques (tourbe,

sapinette, mélange standard, terreau un et deux ans et mélange horticole) sont pratiquement secs ; ils se trouvent tous sans exception en-dessous du point de flétrissement. Les sols minéraux (terre franche, terre de bruyère, limon, sable, terre graveleuse), en vertu de leur caractère hydrophile plus ou moins prononcé ont, à ce niveau, un indice d'humidité encore élevé, se trouvant bien au-dessus du point de flétrissement.



Le graphique montre l'évolution des profils hydriques de deux terres minérales (sable, terre franche) et deux sols organiques (terreaux d'un et deux ans) irrigués par capillarité. Dans les terres minérales, l'humidité décroît très peu par rapport à l'ascension de l'eau alors que dans les terres organiques elle décroît très rapidement pour aboutir à un dessèchement accusé.

Chapitre III

MESURE PHYSIOLOGIQUE DU POINT DE FLETRISSEMENT

Historique

Les premières indications concernant les méthodes de mesure du point de flétrissement reviennent à Briggs et Shantz (1912). Ces auteurs ont défini les différentes formes d'eau retenues dans les sols et ils ont fait connaître une méthode permettant de déterminer indirectement le point de flétrissement et de fixer le « Wilting coefficient ».

Briggs et Shantz montrent que dans un même sol, toutes les plantes réduisent l'eau d'humidification au même pourcentage lorsque le point de flétrissement est atteint. Nous avons vérifié cette constatation, confirmée assez récemment par Veihmeyer, Hendrickson (1949) et Slatyer (1958), en faisant des recherches pour découvrir une plante-test permettant de mesurer le point de flétrissement de tous les sols.

Le point de flétrissement, à l'encontre de son nom, est une caractéristique importante du sol et non de la plante. Ces différents auteurs ont cultivé diverses plantes en plein air, sur le même champ, pendant plusieurs années et ils ont constaté que l'humidité du sol en contact avec les racines était toujours la même lors du point de flétrissement.

Hendrickson et Veihmeyer (1929) ont proposé ensuite le terme de « Permanent wilting percentage » (PWP) pour définir l'état hydrique d'un sol au moment où les plantes se fanent. Cette définition correspond à la limite inférieure de l'eau utilisable des terres. Au-delà, l'extraction de l'eau ne cesse pas, mais elle devient difficile et très faible; à partir de ce moment, la courbe représentant la diminution de l'eau en fonction du temps devient presque horizontale. Au stade du flétrissement permanent, les plantes sont fortement flétries et elles ne récupèrent pas quand elles sont placées en atmosphère saturée, sans addition d'eau sur le sol.

Furr et Reeve (1945) ont apporté des précisions supplémentaires en attirant l'attention sur le « First permanent wilting point » (FPWP). Cet indice correspond à l'humidité du sol pour laquelle les forces agissant sur l'eau se trouvant dans le sol sont approximativement égales à celles existant dans les plantes. Autrement dit, lorsque la pression osmotique du sol s'équilibre avec celle des tissus de la plante. Ce stade se traduit par une cessation de la croissance suivi d'un manque de turgescence.

En fait, la seule méthode de référence pouvant servir de base à l'estimation de l'eau utile des sols est celle qui utilise les plantes-tests.

Esselen (1937), Taylor et Furr (1937) ont cherché à établir des courbes d'extraction de l'eau des sols avec des Citrus, mais les méthodes les plus classiques sont celles de Hendrickson et Veihmeyer (1945), Veihmeyer et Hendrickson (1949), qui consistent à cultiver du tournesol nain (Helianthus annuus nanus).

Ces auteurs se servent pour cela de boîtes, généralement en fer blanc, dotées d'un couvercle troué. Les tournesols issus de graines sélectionnées, sont enfilés à travers le couvercle, et empotés avec la terre à examiner lorsqu'ils ont 3 ou 4 étages de feuilles. Lorsque les terres sont bien mouillées, les couvercles sont ajustés et les plantes laissées à elles-mêmes.

Le point de flétrissement est atteint lorsque les deux feuilles de la base se fanent, ce qui correspond au « First Permanent Wilting ». On procède ensuite au dosage de l'eau en prélevant spécialement la terre se trouvant au voisinage des racines.

D'après Veihmeyer et Hendrickson, la grandeur des tournesols, ou le nombre des feuilles, ne

modifie pas le point de flétrissement, ce qui est logique. Ces mêmes auteurs notent que le point de flétrissement est constant pour chaque sol, quelles que soient les conditions d'évaporation et de transpiration.

En laissant les plantes se faner davantage, on atteint le point de flétrissement permanent, appelé aussi « Ultimate Wilting point ». A ce stade, toutes les feuilles sont très fanées et chez un bon nombre de plantes ce traumatisme provoque la mort des tissus.

I. Mesure du point de flétrissement avec Coleus Blumei Benth. « Golden Bedder »

Après avoir effectué des essais avec plusieurs plantes-tests, dont le tournesol (*Helianthus annuus nanus*), la balsamine (*Impatiens balsamina*), nous avons mis au point la mesure du point de flétrissement avec *Coleus blumei* « Golden Bedder » (DUPERREX. 1962 [1], [2]). Contrairement aux plantes classiques et aux autres espèces expérimentées, le *Coleus* est une plante-test qui a le grand avantage de pouvoir être utilisée dans les terres les plus diverses, même celles qui sont fortement salines ou acides.

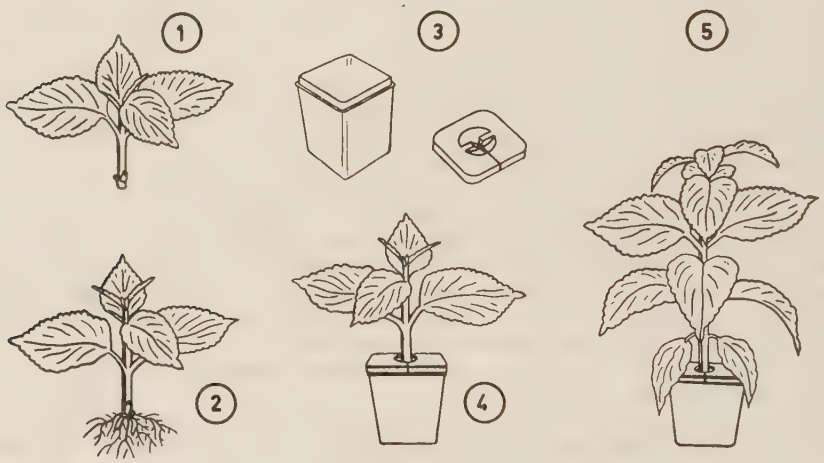


FIG. 1. — Coleus blumei « Golden Bedder ».

1. 1er jour : préparation d'une bouture. — 2. 2e jour : bouture enracinée. — 3. Récipient en plastique avec couvercle perforé et fendu sur le côté pour l'introduction de la plante. — 4. Plante mise en place. — 5. 40e jour : mesure du point de flétrissement.

Les *Coleus* multipliés par bouturage (p. 8) demandent 20 jours à 18° ± 3° pour être enracinés, c'est-à-dire utilisables pour les mesures. A ce stade, les plants mesurent environ 8-10 cm de hauteur. Ils sont arrachés délicatement des terrines de multiplication et leur système radiculaire est débarrassé du sable par lavage à l'eau. Il ne reste plus, ensuite, qu'à se procurer des récipients de culture. Nous avons adopté les boîtes en matière plastique vendues dans les grands magasins pour conserver les condiments. Celles que nous avons adoptées, que nous

utilisons par grandes séries, ont une contenance de 150 ml ; elles mesurent 7,5 cm de haut et 6 cm de côté à leur niveau supérieur. Le couvercle est percé à chaud, d'un trou ayant le diamètre des tiges de Coleus ; il est en outre fendu sur le côté pour permettre l'introduction de la plante.

La mise en place du *Coleus* pour la mesure se fait dans la terre à étudier. Plantes et pots de plastique privés de leur couvercle sont arrosés pendant une dizaine de jours. Ensuite on place le couvercle et la plante est abandonnée avec sa provision d'eau imbibant la terre. Il ne reste qu'à attendre le flétrissement. En été, avec une T moyenne de 23° ± 5° C, il se manifeste environ 5 jours plus tard, tandis qu'en hiver à 18° ± 3°, il faut attendre près de 10 jours.

Le choix du moment de la mesure demande beaucoup d'attention. Lorsque les deux feuilles opposées de l'étage du bas montrent un léger abaissement, il faut suivre les séries de plantes de très près. Dès que ces feuilles quittent la position horizontale et qu'elles s'affaissent, la plante de Coleus est prête pour la mesure.

Le couvercle de plastique est enlevé, la plante extraite de la boîte avec ses racines est placée sur un papier. Très rapidement, la motte est écrasée et un échantillon moyen de terre est mis dans un flacon à peser en verre, possédant un couvercle rodé.

Le flacon plein de terre est pesé, placé dans l'étuve à 105° pendant 12 heures et repesé. Le calcul du pour cent d'eau est établi par rapport à la terre sèche à 105°.

Le rythme de l'opération se résume donc de la façon suivante : 1er jour, préparation des boutures ; 20^{e} jour, boutures enracinées mises en place dans la terre à étudier ; 40^{e} jour, détermination du point de flétrissement. En réalité, lorsqu'on dispose de séries de *Coleus* bouturés à l'avance, ceux-ci peuvent attendre facilement une ou deux semaines en terrines, il ne faut que 20 jours au maximum, parfois seulement 15 en été, pour connaître le point de flétrissement des terres au moyen de cette plante-test.

Eau des sols au point de flétrissement déterminée à l'aide de Coleus blumei « *Golden Bedder* »

Terres	% d'eau
Tourbe	110
Sapinette	80
Mélange standard	88
Terreau un an	50
Terreau deux ans	35
Mélange horticole	24
Terre de bruyère	22
Terre franche	20
Limon	5
Sable	1,5
Terre graveleuse	2

Toutes nos mesures concernent le point de flétrissement temporaire, ou « First permanent Wilting point ». Les résultats correspondent ainsi à l'état hydrique des terres au moment où les deux feuilles de la base des Coleus sont les seules qui soient fanées et qui pendent d'une façon distincte.

Ce moment est délicat à observer, car il est souvent de courte durée. Nous avons constaté que les mesures effectuées entre 23 et 25° étaient les plus précises. A une température inférieure, le flétrissement des feuilles s'effectue trop lentement et il est difficile de fixer avec certitude l'instant de la mesure ; à une température plus élevée, spécialement lorsque les plantes sont exposées à une forte intensité lumineuse, la transpiration des feuilles devient très active et rapidement plus importante que l'absorption de l'eau par les racines. On assiste alors à un point de flétrissement prématuré, souvent temporaire, qui ne correspond pas toujours au point de flétrissement du sol.

Les résultats que l'on obtient de cette manière sont comparables à ceux enregistrés avec le tournesol et l'impatiens.

Point de flétrissement de sols calcaires et acides déterminés avec trois plantes-tests

(eau exprimée en % par rapport à la terre séchée à 105°)

Terres	*Coleus* (nouvelle)	*Impatiens* (nouvelle)	*Helianthus* (classique)
—	—	—	—
Sols calcaires :			
Terre franche (pH = 7,6, Ca = 13,1 %)	20	19	19
Mélange horticole (pH = 6,9, Ca = 18,4 %)	24	24	26
Sols acides :			
Terre de bruyère (pH = 3,9, Ca = 0 %)	22	29	—
Tourbe (pH = 4,0, Ca = 0 %)	110	115	—

Le tableau où sont confrontés les points de flétrissement des terres calcaires et acides montrent qu'avec des sols courants, terre franche et mélange horticole, on a des résultats satisfaisants, quelle que soit la plante-test utilisée. En revanche, dans les terres acides, le tournesol (*Helianthus*) est immédiatement névrosé au collet tandis que la balsamine (*Impatiens*) présente un flétrissement très difficile à observer. Avec ces deux plantes, les mesures sont pratiquement impossibles dans ces sortes de terres.

Le *Coleus blumei* « Golden Bedder » reste donc la seule plante-test valable pour tous les types de sol.

II. Ecarts-types des mesures du point de flétrissement avec Coleus Blumei « Golden Bedder »

Afin de connaître la précision des mesures physiologiques du point de flétrissement, nous avons procédé à des essais comprenant un assez grand nombre de plantes pour une seule terre.

Les recherches ont été simplifiées en restreignant les mesures à deux types de sol ayant des caractères très opposés : la tourbe, le sable.

Les Coleus utilisés comme plantes-tests sont mis en place en observant les mêmes conditions que celles décrites pour les mesures du point de flétrissement de toutes les terres.

Nous avons mis en culture suffisamment de plantes de façon à prélever 32 plantes-tests pour chaque série de mesures.

L'écart-type moyen est calculé selon la formule de BESSEL, déjà utilisée pour estimer la précision des mesures d'essorage à 1/3 d'atmosphère.

Il ressort des calculs, que les plantes de *Coleus* permettent de mesurer le point de flétrissement avec la précision suivante :

Tourbe : L'écart-type est de $\pm$ 11,2.

Par rapport à la moyenne qui est de 110 %, la variation en plus ou en moins est de 10,2 %.

Sable : L'écart-type est de $\pm$ 0,14.

Par rapport à la moyenne, 1,5 %, la variation est de 9,3 %.

En conclusion, on peut donc donner aux mesures physiologiques du point de flétrissement un ordre de précision qui est d'environ 10 %. Compte tenu de l'extrême hétérogénéité des matières soumises aux mesures et du fait qu'il s'agit de tests effectués avec du matériel vivant, l'écart-type s'avère raisonnable.

III. Mesure du point de flétrissement avec la méthode des racines adventives

BREAZEALE et Mc GEORGE (1949), se basant sur le fait que le point de flétrissement correspond, pour un sol donné, à l'humidité pour laquelle la force de succion des plantes est égale à la force de rétention du sol, proposent une méthode particulière fondée sur l'émission des racines adventives.

Ils procèdent de la façon suivante en utilisant des plantes de tomates âgées de 1-2 mois comme plantes-tests.

Les plantes sont cultivées dans des pots normaux et les feuilles de la base de la tige sont supprimées sur une longueur de 10 cm. On glisse ensuite la partie inférieure de la tige dans un tube de verre de 3 $\times$ 5 cm. La base de ce tube est fermée avec un bouchon paraffiné puis, le tube est rempli avec de la terre, sèche ou mouillée; il est fermé à sa partie supérieure avec un deuxième bouchon paraffiné. Après un certain temps, les racines adventives apparaissent en envahissent la terre. Les tubes pleins de terre mouillée sont plus vite garnis de racines que ceux contenant de la terre sèche. Le dosage de l'eau se fait lorsque les racines occupent l'ensemble de la masse de terre. On constate alors que dans les deux cas le pour cent d'eau de la terre est ramené au point de flétrissement.

Nous avons essayé d'adopter cette méthode en utilisant des *Coleus*, à la place des tomates, et en remplaçant les tubes de verre par des manchons de plastique, beaucoup plus faciles à poser.

Pour cela, nous avons choisi des Coleus de 20 cm. de hauteur; la base de la tige a été défeuillée et incisée verticalement sur 3-4 cm. pour faciliter l'émission des racines adventives. Nous avons pris ensuite des bandes de polyéthylène de 15 cm. de largeur et nous avons constitué un manchon ligaturé d'abord à la base avec deux ou trois tours de fil de fer doux. L'intérieur du manchon a été rempli de terre saturée d'eau, puis le haut du dispositif fermé avec un cerclage de fil de fer.

Les manchons posés sur des séries de coleus avec les onze terres expérimentales ont été mis en serre un premier février. Il a fallu attendre deux mois pour obtenir un enracinement suffisant et effectuer le dosage de l'eau.

Points de flétrissement déterminés avec Coleus blumei « *Golden Bedder* » *d'après la méthode de Breazeale et Mc George*

Terres	% d'eau
Tourbe	94
Sapinette	74
Mélange standard	78
Terreau un an	60
Terreau deux ans	35
Mélange horticole	24
Terre de bruyère	12
Terre franche	17
Limon	7
Sable	1,4
Terre graveleuse	2

Les résultats obtenus avec cette méthode basée sur l'équilibre entre les pressions osmotiques des racines adventives et du sol sont assez semblables, en ce qui concerne les terres minérales, à ceux qu'on enregistre en observant le flétrissement des feuilles.

En revanche, pour les terres organiques, notamment celles de structure grossière, les chiffres sont tous plus faibles et correspondent à un point de flétrissement plus accusé que le « First wilting permanent ». Nous avons constaté que l'émission des racines adventives était plus irrégulière et la répartition moins bonne dans les terres organiques que dans les terres minérales.

Ce phénomène n'intervient pas dans les mesures effectuées avec la méthode précédente car les terres quelles qu'elles soient sont immédiatement explorées par l'important système radiculaire des boutures.

Chapitre IV

INFLUENCE DE CERTAINS FACTEURS SUR LE POINT DE FLETRISSEMENT

I. Délai d'attente pour les mesures

Bien que le point de flétrissement dépende du sol et non de la plante (BRIGGS et SHANTZ, 1912 ; VEIHMEYER et HENDRICKSON, 1949), nous avons quand même tenu à faire des essais pour savoir si l'âge d'une plante-test, autrement dit si la durée de la période de végétation précédant une mesure a une influence sur le point de flétrissement.

Pour ce contrôle, nous avons employé du mélange standard car, de tous les milieux très favorables à la végétation, c'est celui qui présente le plus d'homogénéité.

Les coleus utilisés comme plantes-tests sont préparés selon la méthode décrite plus haut. Les boutures enracinées, âgées de 20 jours, sont empotées en série dans les récipient en plastique avec couvercle et le mélange standard est maintenu humide par des arrosages réguliers. Ceci pour que le système radiculaire s'installe entre les particules de matière organique.

Les plantes-tests ayant le même âge et la même hauteur sont divisées en deux groupes. Les coleus du premier groupe sont destinés à être soumis au flétrissement un mois après la mise en place, tandis que ceux de la deuxième série sont maintenus en place pendant deux mois.

Après un mois de culture en récipients spéciaux pour la mesure du point de flétrissement, les coleus ont encore approximativement leur grandeur initiale et leur système radiculaire est dispersé dans la terre sans former de feutrage dense. Les plantes âgées de deux mois sont environ deux fois plus grandes qu'au départ et elles ont des racines très développées, constituant un feutrage épais au fond des récipients en plastique.

Points de flétrissement

(eau exprimée en % par rapport au mélange séché à 105°)

Age des plantes	Mesures moyennes	minimum	maximum
Coleus 1 mois	85,4	82,0	91,7
Coleus 2 mois	86,8	82,8	90,4

Il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux mesures faites à un mois d'écart, c'est-à-dire avec des plantes de grandeur et de vigueur différentes. Le point de flétrissement se présente donc bien comme une mesure du sol sans rapport avec l'état morphologique de la plante-test.

Ainsi, la mesure du point de flétrissement par la méthode physiologique peut être effectuée en tous temps, pourvu que les racines de la plante-test soient en contact étroit avec la terre à mesurer.

II. Effet de la granulation

Les mesures du point de ressuyage à 1/3 d'atmosphère montrent que la modification de la structure d'un sol change son pouvoir de rétention à l'égard de l'eau. Les terres brutes, donc grossières, retiennent moins d'eau par rapport à leur poids que lorsqu'elles sont réduites à 2 mm par broyage ou par tamisage.

Il est donc important de savoir ce qui se passe lorsqu'on mesure le point de flétrissement, soit d'une terre brute, soit d'une terre réduite à 2 mm, avec une plante-test.

Nous avons effectué une série d'essais avec le mélange standard. A l'état brut, ce mélange comprend 57 % d'éléments organiques variant de 2 à 25 mm de diamètre. Une certaine quantité de ce milieu de culture a été broyée pour être amenée entièrement à 2 mm.

Ensuite, nous avons mis en place des boutures enracinées de *Coleus* dans ces deux formes de mélange standard et nous avons mesuré le point de flétrissement en suivant notre méthode.

Points de flétrissement

(eau exprimée en % par rapport au mélange séché à 105°)

Types de terre	Mesures moyennes	Mesures minimum	Mesures maximum
Mélange standard brut	86,8	82,8	90,4
Mélange standard broyé	76,6	73,6	80,6

Ces mesures répétées à plusieurs reprises font constater que le point de flétrissement est plus faible dans le mélange broyé que dans le mélange brut. Les mesures enregistrées par l'intermédiaire d'une plante-test donnent des chiffres qui sont environ 10 % inférieurs à ceux du mélange brut. Avec un procédé physique, par exemple en essorant la terre par dépression, on obtient un résultat absolument inverse (p. 21).

Burov (1952), Holmes (1960), puis récemment Feodoroff et Rafi (1963), ont constaté comme nous que les pertes d'eau du sol par évaporation sont plus fortes lorsque les agrégats mesurent de 10-50 mm que quand ils ont une dimension inférieure à 3 mm. Selon Feodoroff et Rafi, cette particularité s'explique par le fait que la surface totale de

contact entre l'air ambiant et le sol humide est plus grande dans les terres formées de gros agrégats.

En revanche, lorsque l'eau contenue dans une terre est extraite par les racines des plantes, il ne s'agit plus d'une simple évaporation mais d'une succion où intervient le phénomène de contact racines-particules du sol que nous avons évoqué plus loin à propos des points de flétrissement en présence de sulfate de potassium (p. 49).

On sait que les sols à éléments fin comme le sable provoquent une forte division du système radiculaire. C'est d'ailleurs principalement pour cette raison que les boutures se font dans du sable et que les horticulteurs ajoutent de cet élément à leurs mélanges de terres.

Dès lors, on peut très bien concevoir que dans un sol à éléments inférieurs à 2 mm, l'eau est mieux absorbée dans ses derniers retranchements que dans une terre grossière. Les phénomènes de contact, racines-particules du sol, y sont ainsi meilleurs, plus efficaces, du fait que le réseau de racines est plus fin et plus abondant,

III. Effet des amendements synthétiques

Au cours de précédentes recherches (DESHUSSES et DUPERREX, 1953) nous avons étudié certaines résines synthétiques ayant la propriété d'agglomérer les petites particules de terre pour constituer des agrégats. Ces substances répandues dans le commerce sous le nom de Krilium, Terrium, etc. produisent une amélioration considérable de la structure des terres.

Dans le cadre de ce travail, nous avons constaté que l'adjonction d'amendements synthétiques, tel que le Krilium, n'influence que fort peu les propriétés hydriques des terres.

IV. Effet de l'éclairage

En exposant des plantes de *Coleus blumei* « Golden Bedder » à différentes durées d'éclairage afin d'en connaître le groupe photopériodique, nous avons fait parallèlement des contrôles du point de flétrissement. Ceci pour savoir ce qui se passe lorsque les plantes sont différemment éclairées.

En éclairant les *Coleus* avec différents types d'éclairage, nous avons noté que les boutons floraux apparaissent après 53 jours de cultures en régime de jours longs, que la durée du jour ainsi que la couleur de la lumière agissent fortement sur la végétation des plantes ; mais le point de flétrissement est le même quel que soit l'aspect morphologique des plantes utilisées pour les mesures.

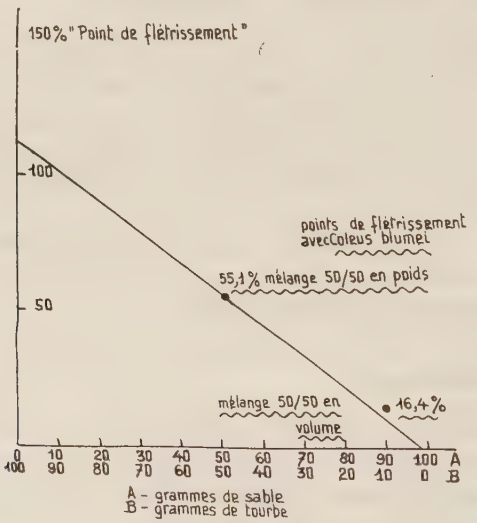
V. Point de flétrissement des mélanges de terres

Ce problème a fait l'objet de certaines recherches. SEGEBERG (1958) s'est occupé de l'évolution du point de flétrissement des terres sablon-

neuses additionnées de différents pourcentages d'« humus ». MALYSHEW (1959) a attiré l'attention sur la modification du pouvoir de rétention, à l'égard de l'eau, des sols ayant reçu des suspensions aqueuses de tourbe. Enfin, JAMISON (1960) a étudié l'influence de l'enfouissement des résidus de récolte sur l'humidité des sols, tandis que GERTH s'est attaché au rôle de l'humus et de l'argile sur la rétention de l'eau dans les sols.

Ces travaux montrent tous que le caractère hydrique de chaque milieu de culture est immédiatement modifié par le moindre apport d'élément étranger. Aussi, avons-nous voulu examiner dans quelle mesure le point de flétrissement est modifié lorsqu'on mélange entre eux des sols de caractères physiques différents.

Pour simplifier nos essais et surtout pour les rendre plus significatifs, nous nous sommes arrêtés à deux de nos sols présentant les caractères les plus opposés : la tourbe formée de matière organique essentiellement fibreuse et grossière, dont la densité est très faible, et le sable. milieu minéral d'une grande finesse et d'une densité élevée.



Point de flétrissement (calculés et observés) des mélanges de tourbe et de sable

Nos essais mettent bien en évidence le rôle important joué par la densité des milieux de culture dans la détermination des caractères hydriques des sols. Ces essais montrent aussi que la façon classique d'exprimer l'eau des terres en pour cent du poids est imprécise si elle n'est pas accompagnée de renseignements sur la densité.

Théoriquement, le point de flétrissement d'un mélange de terres, en poids, se détermine très simplement. Il suffit de multiplier le point de flétrissement de chaque terre par le pourcentage de la part entrant dans le mélange, puis de faire la somme des résultats.

Ainsi, en mélangeant en poids égal 50 % de tourbe (pF = 110 %) et 50 % de sable (pF = 1,3 %) on obtient un mélange qui a un point de flétrissement de 55,65 %.

Avec 25 % de sable et 75 % de tourbe on obtient un point de flétrissement de 82,82 %, tandis qu'en inversant ces proportions, soit 25 % de tourbe et 75 % de sable le mélange a un point de flétrissement de 28,47 %.

On peut établir un graphique où l'on met en abscisse les proportions en pour cent du mélange tourbe-sable et, en ordonnée, le point de flétrissement de la tourbe. En reliant par une ligne oblique les points de flétrissement de la tourbe et du sable, placés aux deux extrémités du graphique, on retrouve sans difficulté le point de flétrissement de tous les mélanges possibles entre ces deux sols.

Les données en poids sont trompeuses. En effet, la tourbe étant environ 25 fois plus légère que le sable, lorsqu'on fait un mélange avec 50 g de tourbe et 50 g de sable on se trouve en face de 890 cm^3 de tourbe et 34 cm^3 de sable : autrement dit, le sable est presque perdu dans la masse de la tourbe et il faut beaucoup d'attention pour que le mélange soit parfait.

La réalisation du second mélange est également intéressante. Avec 10 % de tourbe et 90 % de sable en poids, on obtient un milieu ayant un point de flétrissement plus élevé que lorsqu'on mélange 50 % de tourbe et 50 % de sable en volume.

Points de flétrissement des mélanges de tourbe et de sable avec Coleus blumei
(eau exprimée en % par rapport aux terres séchées à 105°)

Types de mélange	Point de flétrissement observé	Point de flétrissement calculé
en poids : 50 % Tourbe + 50 % sable	55,1	55,65
10 % » + 90 % »	16,4	12,2
en volume : 50 % » + 50 % »	5,8	4,1

Lorsqu'on porte sur le graphique les chiffres du point de flétrissement obtenus avec les plantes-tests, on constate qu'ils concordent assez bien avec les indications théoriques représentées par la ligne oblique reliant les points de flétrissement de la tourbe et du sable. Toutefois, comme il est difficile de créer des mélanges parfaitement homogènes soit à cause de la difficulté des brassages, soit à cause de l'entraînement des particules minérales de petits diamètres par les eaux de gravitation, il arrive que le point de flétrissement du milieu mixte s'écarte plus ou moins de la ligne, ou moyenne, théorique.

VI. Influence des solutions salines

Le ralentissement plus ou moins accentué de la végétation par l'accumulation de certains sels dans les terres est un phénomène bien connu des agronomes et des physiologistes. Il a été décrit par plusieurs chercheurs, notamment par RICHARDS (1947), RUSSELL (1949), RICHARDS et WADLEIGH (1952), WIKLE, DAVIDSON et ERICKSON (1961). Nous avons cherché à connaître les variations du point de flétrissement en fonction de la concentration des sels dans le sol.

Pour augmenter la pression osmotique des solutions salines contenues dans nos terres expérimentales, nous avons choisi le sulfate de potassium puriss. Le potassium a l'avantage de faire partie des éléments majeurs du sol et, surtout, d'être assez bien retenu par la matière organique et par l'argile.

Nous avons préparé pour nos essais une solution NPK à 0,5 g par litre constituant le témoin et quatre types de solution d'une pression osmotique aussi proche que possible de 1, 2, 4 et 16 atmosphères.

Voici les solutions que nous avons utilisées :

1	atmosphère	=	2,79 gr. de	$K_2 SO_4$ par	litre d'eau
2	»	=	5,58 gr. de	»	»
4	»	=	11,17 gr. de	»	»
16	»	=	44,66 gr. de	»	»

Les concentrations ont été calculées avec la formule classique dérivée de la loi de Van t'Hoff et en tenant compte, le mieux possible, du degré de dissociation électrolytique. Les concentrations ont été choisies de telle façon qu'elles nous offrent une gamme de potentiels capillaires allant jusqu'au point de flétrissement permanent, soit pF = 4,2.

A titre indicatif, nous avons mesuré le pH de ces solutions ; ce dernier oscille entre 7,2 et 7,3.

Plantes arrosées avec des solutions salines :

Les mesures du point de flétrissement ont été faites selon notre méthode, c'est-à-dire avec les boutures enracinées de *Coleus blumei* « Golden Bedder ».

Les plantes-tests ont été groupées en séries, arrosées uniquement et quotidiennement avec les différentes solutions ci-dessus. Les cultures ont été soumises à ce régime pendant un mois.

Quand on place des boutures enracinées de *Coleus*, dont les racines ont été bien lavées, dans des Bechers remplis de ces solutions, on observe à 22° ± 3° C, les temps de flétrissement suivants :

16	atmosphères	=	flétrissement	après	1 1/2	heure
4	»	=	»		10	heures
2	»	=	pas de flétrissement visible			
1	»	=	»			

Il est intéressant de noter que lorsque les racines de *Coleus* sont en contact avec la terre, on n'observe pas tout de suite un flétrissement

après l'arrosage avec les solutions concentrées, mais un ralentissement progressif de la croissance.

Fig. 2. — Freinage de la végétation des coleus provoqué par des arrosages avec des solutions de sulfate de potasse de concentration croissante. Les points de flétrissement des sols augmentent avec la concentration des solutions d'arrosage.

Les *Coleus* placés dans un Becher contenant de la tourbe immergée avec les solutions à 2,4 ou 16 atmosphères, ne se fanent pas instantanément. Les plantes en contact avec la solution à 16 atmosphères atteignent le point de flétrissement temporaire après 2-3 semaines de culture à 22° ± 3° C. A partir de ce stade, le point de flétrissement devient permanent et les plantes dépérissent. La tourbe joue ici un rôle tampon ou intermédiaire entre les solutions du sol et les racines ; ce rôle dont nous avons déjà remarqué l'importance particulière à propos des solutions acides des sols et de l'absorption de l'eau dans les sols organiques (p. 45) a été défini sous le nom de phénomène de contact racines-particules de sol par Jenny et In Truog (1953), Blanchet, Chaumont et Studer (1962).

Les mensurations de l'état végétatif des *Coleus*, après un mois de culture, montrent le freinage de la croissance provoqué par les différentes solutions de sulfate de potassium.

Afin d'effectuer nos mesures avec plus de sécurité, nous avons limité nos essais à deux terres organiques (tourbe et mélange standard) et deux terres minérales (terre franche et limon).

Hauteur moyenne des Coleus *après un mois de culture*
(H. mesurée à partir du niveau du sol)

Terres	Témoin N.P.K.	1 atm.	2 atm.	4 atm.	16 atm.
Tourbe	24 cm.	20,5 cm.	18 cm.	15,5 cm.	15 cm.
Mélange standard	24	18	18,5	16	15,5
Terre franche	22,5	20	19	13	13,5
Limon	22	22	19,5	16	12,7

Quant au point de flétrissement, les mesures montrent qu'il est fortement influencé par le sulfate de potassium qui s'est accumulé de façon assez semblable dans les sols organiques et minéraux.

Point de flétrissement des terres irriguées avec des solutions de sulfate de potassium
(eau exprimée en % par rapport aux terres séchées à 105°)

Terres	Témoin N.P.K.	1 atm.	2 atm.	4 atm.	16 atm.
Tourbe	108	165	209	250	619
Mélange standard	81	87	91	94	207
Terre franche	17	18	19	23	51
Limon	5	6	6,3	9	27

Les résultats obtenus après 3-4 semaines d'arrosage, avec la solution de sulfate de potassium à 16 atmosphères, sont voisins de ceux qui correspondent à la capacité de rétention totale après 30 heures de drainage sur tamis. Ils sont calculés, comme pour tous les points de flétrissement, par rapport à la terre séchée à 105°.

Comparaison entre le point de flétrissement des terres irriguées avec une solution à 16 *atm. et la rétention totale*

Terres	pF à 16 atm.	Rétention totale
Tourbe	619	899
Mélange standard	207	301
Terre franche	51	57
Limon	27	36

A la suite de ces résultats basés sur des tests physiologiques, nous avons mesuré le point de flétrissement de la tourbe et de la terre franche chargées de sels par centrifugation à 1 000 G.

Nous avons utilisé la méthode décrite précédemment au chapitre des mesures physiques du point de flétrissement (p. 25). Cette dernière étant rapide à exécuter, nous avons voulu connaître sa valeur pour les terres irriguées avec des solutions salines d'une pression osmotique plus ou moins élevée.

Mesures du point de flétrissement avec la centrifugeuse
(eau exprimée en % par rapport à la terre séchée à 105°)

Terres	1 atm.	2 atm.	4 atm.	16 atm.
Tourbe	109	103	98	126
Terre franche	19,5	19,6	17,4	21

En examinant les résultats obtenus avec la centrifugeuse à 1 000 G, on constate que ce procédé ne révèle pas de différences significatives entre les terres arrosées abondamment avec des solutions salines plus ou moins concentrées. Si l'on prend l'exemple de la terre franche imprégnée d'une solution à 1 atm., on constate que le *Coleus* se fane quand la terre contient 18 % d'eau ; avec la solution à 16 atm. le point de flétrissement est atteint alors que la terre contient encore 51 % d'eau, chiffre qui est proche de celui de la rétention totale (57 %). Ainsi, l'augmentation de la pression osmotique des solutions du sol entraîne une élévation du point de flétrissement. Avec la centrifugeuse à 1 000 G, on n'enregistre pas ces différences ; les solutions à 1 et 16 atm. donnent respectivement 19,5 % et 21 % comme point de flétrissement. La présence de sels dans les terres, dont l'effet sur la végétation est primordial, passe pratiquement inaperçue quand le point de flétrissement est déterminé selon cette méthode physique.

La plante-test reste donc la seule référence sûre pour déceler l'influence de tout facteur intervenant dans la consommation de l'eau ; autrement dit, de tout facteur diminuant la quantité d'eau disponible des terres et, de ce fait, paralysant la végétation.

VII. Mesures des sels par la conductibilité ou la résistance électrique

Partant des importants travaux de RICHARDS (1947) sur la résistance électrique des sols, nous avons cherché à savoir dans quelle mesure on peut déterminer facilement la teneur des terres en sels par la mesure de la conductibilité.

Chaque terre est caractérisée par une courbe particulière et aucun rapprochement ne peut être envisagé entre les diverses courbes. Il n'existe, notamment, aucun rapport commun entre les quantités de sels et la conductibilité ; il fallait certes s'y attendre puisqu'aussi bien

chaque terre contient ses propres sels et possède un pouvoir propre d'absorption des ions.

VIII. Nombre d'atmosphères pour obtenir le flétrissement immédiat des Coleus

En examinant les essais précédents concernant l'arrosage des *Coleus* avec des solutions concentrées de sulfate de potassium, on constate que les plantes ne s'affaissent pas immédiatement. Il se passe un certain temps pendant lequel les plantes continuent à se maintenir rigides, bien

Concentration en ATMOS.	Etat des boutures après 2 heures	4 1/2 h.	24 h.	4 jours
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
10				
16				

Flétrissement des boutures de Coleus blumei dont les racines trempent dans une solution de sulfate de potassium

qu'elles aient reçu des arrosages avec des solutions d'une pression osmotique voisine de 16 atmosphères. Tout porte à croire que les plantes dont le système radiculaire est étroitement mêlé aux particules minérales et organiques du sol ne sont pas directement en contact avec les solutions salines imbibant le milieu de culture, mais bien plutôt avec le sol. Afin d'avoir une idée plus précise de ce phénomène de contact, « racines-particules de sol », nous avons entrepris plusieurs essais avec une gamme de solutions de sulfate de potassium dont la pression osmotique varie régulièrement de 1 à 25 atmosphères.

a) Point de flétrissement dans les solutions :

Nous avons placé des boutures enracinées de *Coleus*, âgées de 20 jours, dont les racines avaient été lavées minutieusement, dans des flacons d'Erlenmeyer remplis avec des solutions dont la pression varie de 1 à 10 atmosphères.

Les plantes maintenues sur le col du flacon par l'étage inférieur de feuilles avaient ainsi toutes leurs racines dans les solutions de sulfate de potassium.

Les boutures enracinées ont été mises en même temps dans toutes les solutions et nous avons noté la rapidité avec laquelle elles perdent leur turgescence.

Solutions à 1-2 atm. — Après 4 jours, les *Coleus* sont encore rigides et on n'observe aucune anomalie morphologique, si ce n'est des efflorescences cristallines blanches localisées entre le haut du pétiole et la base du limbe. A cette concentration il n'y a pas de flétrissement.

Solutions à 2-3-5 atm. — Après 24 heures, on constate une légère inflexion du sommet de la tige; il faut attendre 4 jours pour avoir un flétrissement marqué.

Solutions à 6-7-8 atm. — Après 2 heures, légère inflexion du sommet de la tige; le point de flétrissement est atteint au bout de 24 heures.

Solution à 10 atm. — Après 2 heures, l'inflexion de la tige est très marquée et au bout de 4 heures le point de flétrissement est déjà accusé.

Solution à 16 atm. — En moins de deux heures, les *Coleus* sont tous affaissés.

b) Point de flétrissement dans les terres :

Chez les plantes tenues en solution, le métabolisme des plantes est nettement entravé au-delà d'une pression osmotique de 2 atmosphères, c'est-à-dire dès qu'il y a plus de 5,6 g de sel par litre d'eau. Il est d'ailleurs important de noter que lorsqu'on dépasse la dose de 4 atm., soit 11,1 g par litre, le collet des *Coleus* est corrodé, brun, au bout du sixième jour.

Comme on ne peut pas provoquer un flétrissement immédiat des *Coleus* tenus en terre en leur appliquant un seul arrosage avec une solution ayant une pression osmotique d'environ 16 atm., nous avons effectué des arrosages avec des solutions de 18 et 20 atm. sur des Coleus cultivés dans nos onze terres expérimentales.

Ces deux concentrations, correspondant aux doses énormes de 50,2 et 55,8 g de sulfate de potasse par litre, ont des effets pratiquement semblables sur les Coleus.

Dans les deux *mélanges, horticole et standard*, ainsi que dans la *terre franche*, les plantes-tests ne manifestent pas de flétrissement en moins de 24 heures.

Dans la *terre de bruyère*, les *terreaux de un* et *deux ans* et le *limon*, les plantes sont partout à moitié affaissées dans les 24 heures.

Dans la *tourbe*, la *sapinette*, le *sable* et la *terre graveleuse* les plantes sont beaucoup plus vite affaissées ; le point de flétrissement est atteint en moins d'une dizaine d'heures.

Il est important de signaler que ces solutions ont été appliquées en arrosage sur des boutures enracinées, empotées dans les terres depuis

deux jours. Les pots ont été irrigués copieusement, à plusieurs reprises, de façon à ce que l'excédent de solution s'écoule chaque fois par la base trouée du pot. De cette façon, chaque terre était bien lessivée et imprégnée par la solution expérimentale. Nous constatons un effet protecteur de l'argile (terre franche et mélange horticole) et du vieil humus (mélange standard).

c) Essai comparatif sur des plantes de différents âges :

Pour compléter cette série d'observations, nous avons entrepris des essais comparatifs avec des plantes ayant un âge et un aspect végétatif différents.

Nous avons choisi trois types de *Coleus*, cultivés seulement dans le sable et la tourbe, arrachés et mis en pot le jour de l'essai.

Les plantes ont été copieusement arrosées en même temps avec des solutions de 16, 20 et 25 atmosphères, ce qui représente les doses extraordinaires de 44,6 g, 55,8 g et 69,7 g de sulfate de potassium par litre d'eau.

Coleus d'un mois. — Dans le sable, les plantes manifestent un léger affaissement à 16 atm. et un flétrissement accusé à 20 et 25 atm. au bout de 4-5 heures. Dans la tourbe, l'affaissement est différé de quelques heures.

Coleus de deux mois. — Dans la tourbe et le sable, un arrosage à 16 atm. est pratiquement sans effet immédiat. En revanche, la solution à 20 atm. provoque le fanage des 4 étages inférieurs de feuilles, avec leurs pousses axillaires, tandis que les 3 étages supérieurs sont turgescents. Avec 25 atm. le flétrissement est immédiat et total.

Coleus de six mois. — Les plantes ne manifestent pas le moindre flétrissement immédiat avec les solutions à 16, 20 et 25 atm., ni au cours de la première journée ni dans les prochains jours. Pour les faire flétrir, il faut la concentration incroyable de 30 atm., soit 83,5 g de sulfate de potassium par litre d'eau.

IX. Point de flétrissement des terres contenant du chlorure de sodium

Nous avons constaté que la présence de NaCl dans certaines terres exposées aux marées est la cause de difficultés dans la mesure du point de flétrissement

Il ressort de nos essais que le *Coleus* que nous proposons comme plante-test se prête aux mesures de l'eau dans les terres imprégnées de sels marins. On dispose largement du temps nécessaire pour effectuer une mesure physiologique avant que le *Coleus* ne soit totalement intoxiqué.

Chapitre V

INFLUENCE DU REGIME HYDRIQUE DU SOL SUR LA CROISSANCE

I. Culture au point de flétrissement et à la rétention totale

Comment s'effectue la croissance des plantes lorsque l'eau utilisable d'une terre diminue ?

Est-ce que toute l'eau d'un sol comprise entre la « Field capacity » et le point de flétrissement permet une végétation égale et régulière ou, au contraire, la croissance des plantes est-elle maximale quand l'état hydrique de la terre est près de la rétention totale puis se ralentit-elle avec la diminution de l'eau utilisable ?

Cette question a fait l'objet de divers travaux dont les résultats sont encore très controversés. Au cours d'un colloque d'Ecophysiologie, sur le bilan d'eau des plantes vasculaires, LEMÉE (1959) résume ainsi l'état actuel de ce problème : « Les écologistes américains, israéliens et russes se sont beaucoup occupés, pour des raisons économiques, de cette question et ont abouti à deux conceptions opposées. Les américains VEIHMEYER et HENDRICKSON (1948-1949) ont été les combatifs défenseurs de l'idée que l'eau est également accessible dans toute la tranche d'humidité comprise entre la « field capacity » et le pourcentage de fanaison, autrement dit, que l'absorption et la transpiration, la photosynthèse et la croissance, se maintenaient égales jusqu'à l'épuisement de l'eau disponible, et s'effondraient alors subitement. Les américains RICHARDS et WEEKS (1953), WADLEIGH (1946), KRAMER (1949), ainsi que les israéliens et les russes, constataient au contraire une accessibilité décroissante de l'eau pour la plante bien avant que ce terme soit atteint. »

De son côté HALLAIRE (1963) rappelle aussi ces travaux contradictoires en étudiant certains aspects du potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. Si VEIHMEYER constate que l'évaporation d'un sol demeure maximale sur la totalité de la gamme d'humidité, RICHARDS et WEEKS observent au contraire une décroissance régulière. STANHILL (1957) a également remarqué que les rendements sont d'autant plus élevés que les irrigations ont été plus fréquentes. TAYLOR (1961) arrive à des résultats semblables. Enfin, KHUDAIRI, ABDUL WAHALS et THEWANI (1961) montrent que la croissance de la plante atteint son maximum lorsque le degré d'humidité du sol varie entre 75 et 100 % de la capa-

cité de rétention. Pour que la culture soit profitable, le degré d'humidité ne doit pas être inférieur à 50 % de l'eau utile. A 25 % la croissance diminue et, enfin, à 12,5 % la croissance des plantes est réduite au minimum.

En outre, ROBINSON (1957) et DOMMERGUES (1960) remarquent que l'ammonification et la minéralisation sont passablement ralenties lorsque l'humidité passe de 5/6 à 3/6 du point de flétrissement permanent, SHALVENET et ZWERMANN (1962) constatent qu'un excès d'humidité entraîne la formation de substances organiques dont l'effet sur la croissance reste à étudier. Enfin, d'après STUDER et BLANCHET (1963), une bonne alimentation potassique est indispensable à la valorisation de l'eau apportée. En présence d'irrigation, les besoins alimentaires des plantes sont accrus considérablement et il importe alors d'appliquer des fumures minérales très supérieures à celles utilisées ordinairement.

La diversité des résultats de tous ces travaux nous a incités à entreprendre quelques essais avec *Coleus blumei* « Golden Bedder ». Cette plante-test, douée d'une grande souplesse à l'égard de l'alimentation en eau, a l'avantage de réagir d'une façon très nette à la moindre variation du régime hydrique de la terre.

Nous avons préparé pour ce travail un nombre assez important de boutures enracinées de *Coleus* en veillant à ce qu'elles aient toutes la même hauteur et le même nombre d'étages de feuilles opposées. Ces boutures ont été mises dans des pots en terre poreuse avec nos onze terres expérimentales, puis placées sur des cadres en fort treillis dans une serre avec une température de 19° C ± 3°. Enfin, les séries de *Coleus* ont été séparées en deux lots semblables soumis chacun à un régime hydrique particulier (DUPERREX, 1962 [2], [4]).

a) Plantes cultivées près de la rétention totale :

Nous nous sommes arrangés pour que les terres soient toujours maintenues aux environs du point de rétention totale de l'eau. Elles ont été arrosées copieusement par aspersion jusqu'à ce que l'eau s'écoule par le fond des pots. Ceci quatre fois par jour à 8, 12, 14 et 18 heures avec un arrosoir équipé spécialement d'une grille fine.

Les plantes soumises à ce régime hydrique se sont trouvées pendant toute la durée de la culture expérimentale dans des terres saturées d'eau aux environs de la rétention totale. Il n'y a jamais eu d'innondation puisque toute l'eau en excès s'en allait par drainage, à travers le treillis, laissant ainsi l'air pénétrer après chaque arrosage dans les espaces lacunaires du sol. Dans toutes nos terres fines comme le limon, compactes comme la terre franche ou spongieuses comme la tourbe, il ne s'est manifesté aucun symptôme d'asphyxie.

A ce propos, il nous paraît important d'insister sur le fait suivant : Lorsqu'une terre ne repose pas sur un sous-sol imperméable, l'eau de gravitation s'écoule régulièrement sans que l'on observe un engorge-

ment de la terre. On rejoint ainsi les conditions caractérisant certains sous-bois de la forêt ombrophile où il pleut tous les jours et où, pour cette raison, on rencontre la végétation la plus rapide et la plus luxuriante (DUPERREX, 1962 [6]). En revanche, dans tous les sols mal drainés, l'eau ne s'écoule pas, ou s'écoule beaucoup trop lentement, et il est impensable de prévoir des arrosages rapprochés qui exposent la plupart des plantes à une asphyxie plus ou moins rapide.

FIG. 3. — *En haut :* Plantes arrosées copieusement quatre fois par jour.
En bas : Plantes arrosées très modérément au début de chaque premier point de flétrissement.

Les *Coleus* soumis à ce régime hydrique ont été divisés en deux lots, l'un arrosé avec l'eau du réseau, l'autre avec une solution nutritive à 0,5 g de sels (N, P, K, Mg, Mn, Cu, Zn, B) par litre d'eau.

b) Plantes cultivées au-dessus du point de flétrissement :

Pour créer ce régime particulier, nous avons toujours attendu que les terres soient partiellement desséchées, que la paire inférieure de feuilles marque juste le début d'un affaissement, avant de donner de l'eau aux plantes.

Ainsi, les arrosages précédaient chaque fois le point de flétrissement. En outre, l'apport d'eau était dosé chaque fois de façon à ramener l'humidité de la terre à peu près à mi-chemin entre le point de flétrissement et le point de ressuyage.

Les *Coleus* de cet essai ont également été divisés en deux lots, l'un arrosé avec l'eau du réseau, l'autre avec une solution nutritive à 0,5 g par litre.

Les résultats qui suivent résultent de cultures d'une durée d'un mois.

Hauteur des Coleus après 1 mois de culture
(H. mesurée à partir du niveau du sol)

Terres	Cultivés près de la rétention totale		Cultivés près du point de flétrissement	
	avec engrais	sans engrais	avec engrais	sans engrais
Tourbe	33 cm.	18 cm.	13,5 cm.	9,3 cm.
Sapinette	32	18	13	9,2
Mélange standard	34	16,5	12,5	9
Terreau 1 an	33	19	13	8
Terreau 2 ans	33	19	13	9,5
Mélange horticole	35	21	10	8
Terre de bruyère	30	17,5	13	10
Terre franche	32	16,5	11,7	9,7
Limon	29	14,5	9,2	7
Sable	28	15	11,5	9
Terre graveleuse	28	12	9,7	7,3

A la fin de ces essais, nous avons fait quelques prélèvements de terre dans différents pots de *Coleus* en culture pour doser l'eau. Nous avons constaté, ainsi que le montre le tableau, que les terres de *Coleus* maintenues près de la rétention totale avaient une teneur en eau, par rapport à la terre séchée à 105°, située au-dessus du point de ressuyage, mais en-dessous de la rétention totale. En revanche, les plantes soumises à un régime d'assèchement avaient une teneur en eau se situant un peu au-dessus du point de flétrissement.

Eau dans les terres soumises à deux régimes hydriques
(exprimée en % par rapport à la terre séchée à 105°)

Terres	*Culture près de la rétention*	Point de ressuyage	*Culture près du point de flétrissement*	Point de fl. avec Coleus
Tourbe	700	440	165	110
Sapinette	303	182	92	80
Terreau deux ans	104	84	42	35
Terre de bruyère	61	33	28	22
Limon	24	22	7,4	5
Sable	16	6,7	4,2	1,5
Terre graveleuse	5,2	6,3	3,2	2

En définitive, il existe une grande différence de croissance entre les plantes ayant reçu des arrosages abondants (culture près de la rétention totale) et celles qui ont reçu des quantités d'eau modérées.

Chapitre VI

CONDITIONS DE LA TURGESCENCE

I. Eau dans les plantes turgescentes

La détermination de la quantité d'eau contenue dans les tissus végétaux a fait l'objet d'un grand nombre de recherches. Les tables de CHATFIELD et ADAM (1940), les travaux détaillés de GANE (1941), ENDERLE (1951), KRAMER (1955), KRAMER et CURRIER (1950), BRONISLAW (1962) procurent, notamment, des indications sur la teneur en eau de beaucoup de plantes, de graines et de tissus à différents moments du jour ou de l'état de la plante. En revanche, on est moins bien renseigné quant à l'état hydrique d'une même plante placée dans des conditions de culture très opposées (DUPERREX, 1962 [2]).

Au cours de nos travaux concernant le point de flétrissement et la rétention totale, décrits dans le chapitre précédent, nous avons été amené à déterminer la quantité d'eau et de matières minérales contenues dans nos plantes expérimentales.

Ainsi, nos dosages d'eau ont été effectuées sur des *Coleus blumei* « Golden Bedder », cultivés dans onze terres différentes et soumis à deux régimes hydriques. Dans l'un, les plantes ont été copieusement arrosées et bassinées quatre fois par jour, dans l'autre, elles ont été arrosées au contraire, modérément et seulement lorsque se manifestait le premier signe de flétrissement.

Ces deux séries de plantes ont, en outre, été divisées à leur tour en deux lots, le premier arrosé avec de l'eau, le second avec une solution nutritive à 0,5 g de sels (N.P.K.Mg.Mn.Cu.Zn.B.) par litre d'eau.

Pour déterminer la quantité d'eau contenue dans les plantes de ces différents essais, les *Coleus* ont été coupés au ras du sol et la tige immergée dans l'eau sur 5 cm pendant une nuit afin d'obtenir une turgescence maximale dans tous les cas et d'avoir ainsi des poids frais comparables. Les plantes sont pesées, puis séchées à 105° pendant 24 heures et pesées de nouveau.

La matière sèche restante a été incinérée à 500° afin de déterminer le poids des matières minérales et, par différence, celui de la matière organique.

Les chiffres des tableaux donnent le pourcentage moyen en eau et en cendres (matières minérales) des plantes fraîches après un mois de culture.

Pour-cent moyen d'eau et de matières minérales des plantes fraîches

a) Plantes cultivées près de la rétention totale :

Terres	Avec engrais		Sans engrais	
	eau	cendres	eau	cendres
Tourbe	95,02	1,09	93,45	0,93
Sapinette	94,77	1,07	93,88	0,86
Mélange standard	94,76	1,04	92,89	0,90
Terreau un an	95,05	1,01	93,54	0,90
Terreau deux ans	94,88	1,00	93,96	0,95
Mélange horticole	95,06	1,04	93,35	0,89
Terre franche	94,92	0,99	94,04	1,00
Terre de bruyère	95,15	1,06	92,79	0,92
Limon	94,15	0,93	92,52	1,00
Sable	94,78	1,05	92,59	0,93
Terre graveleuse	94,69	0,98	92,13	0,90

b) Plantes cultivées près du point de flétrissement :

Terres	Avec engrais		Sans engrais	
	eau	cendres	eau	cendres
Tourbe	93,28	1,00	93,39	0,83
Sapinette	93,44	1,11	93,74	0,83
Mélange standard	93,02	1,21	93,80	0,77
Terreau un an	92,83	1,10	92,82	0,97
Terreau deux ans	92,75	0,95	94,24	0,95
Mélange horticole	92,52	1,02	93,63	1,04
Terre franche	92,73	0,98	93,73	1,07
Terre de bruyère	93,14	1,13	93,77	0,87
Limon	90,49	0,90	93,88	0,79
Sable	92,10	1,10	93,53	0,89
Terre graveleuse	92,56	1,05	93,69	0,88

II. Eau dans les Coleus à différents stades de croissance

Après avoir déterminé l'eau dans des *Coleus* de même âge, mais d'aspect morphologique fort différents, nous avons fait des dosages dans des plantes se trouvant aux principaux stades de croissance.

Nos essais montrent que le pour cent d'eau des tissus ne varie pratiquement pas tant que les plantes sont encore jeunes. Après un certain stade, se situant aux environs de six mois, ce pourcentage diminue, ce qui est logique, car c'est à partir de ce moment que l'on observe un début de subérification et une lignification intensifiée des tiges. En effet, nous avons constaté que les tissus verts contiennent toujours 92 % environ d'eau, quel que soit le type de plante dont ils proviennent, tandis que les *Coleus* dont les tiges présentent une coloration externe brune plus ou moins étendue ont une teneur en eau plus ou moins inférieure à 90 %.

III. Eau dans les plantes flétries

A côté des mesures indiquant la quantité d'eau contenue dans les *Coleus* turgescents, il importe de connaître aussi la teneur en eau des plantes au moment du premier point de flétrissement permanent.

Les fluctuations de l'état hydrique des plantes peuvent être exprimées soit par rapport au poids total de la plante, soit d'après la teneur en eau au maximum de la turgescence, ce qui correspond à la « turgescence relative », ou encore en faisant la différence entre le contenu saturé et le contenu observé, ce qui donne le « déficit de saturation hydrique » connu sous l'abréviation DSH (Stocker, 1956 ; Lemée, 1959 ; Mouravieff, 1959).

Nous avons appliqué ces différentes méthodes de calcul à l'eau contenue dans des *Coleus* cultivés dans du mélange standard et du limon. Les plantes expérimentales ont été mises en végétation pendant un mois, puis privées d'arrosage. Arrivées à leur point de flétrissement, elles ont été coupées au ras du sol puis immédiatement pesées, après quoi elles ont été mises dans l'eau pendant une nuit sur une hauteur de 5 cm pour qu'elles reprennent leur turgescence ; enfin, elles ont été pesées à nouveau et séchées à 105°.

A l'aide des chiffres résumant ces diverses opérations, nous avons estimé l'eau dans les plantes flétries par rapport au poids des plantes et par rapport à leur teneur maximale en eau.

a) *Par rapport au poids des plantes.*

Les chiffres (première partie du tableau suivant) permettent de constater que le pour cent moyen d'eau contenue dans les plantes au point de flétrissement temporaire est environ 0,5 % inférieur à celui d'une plante turgescente. Dans les plantes au point de flétrissement permanent, ou flétrissement très accusé, cet abaissement varie autour de 1 %.

Au cours de nos travaux (Duperrex, 1962 [4]), nous avons essayé de ramener l'eau des plantes flétries au poids des plantes turgescentes, au lieu de la rapporter au poids des plantes au moment du flétrissement. Bien que cette méthode soit moins logique, les résultats qu'elle donne n'en sont pas moins assez significatifs (deuxième partie du tableau). Par rapport au poids des plantes turgescentes, les *Coleus* accusent une diminution d'environ 5 % lorsqu'ils sont peu flétris et 10 %, ou davantage, quand ils présentent un flétrissement accusé.

Eau dans les plantes turgescentes et flétries

1. % d'eau par rapport au poids réel :

Séries de terres	Plantes turgescentes	Plantes flétries	Différence
a) au point de flétrissement temporaire :			
Mélange standard	92,71	92,24	0,47
Limon	92,38	91,98	0,40
b) au point de flétrissement permanent :			
Mélange standard	93,00	92,28	0,72
Limon	93,69	92,69	1,00

2. % d'eau des plantes flétries par rapport au poids des plantes turgescentes :

Séries de terres	Plantes turgescentes	Plantes flétries	Différence
a) au point de flétrissement temporaire :			
Mélange standard	92,71	86,56	6,15
Limon	92,38	87,40	4,98
b) au point de flétrissement permanent :			
Mélange standard	93,00	82,61	10,39
Limon	93,69	79,97	13,82

b) *Par rapport à la teneur maximale en eau.*

La quantité d'eau contenue dans les plantes, par rapport à la turgescence, se détermine d'après la « turgescence relative » ou le « déficit de saturation hydrique ».

Turgescence relative. — Elle indique la proportion d'eau contenue dans une plante au stade du flétrissement (contenu observé) par rapport au point de turgescence maximale (contenu saturé). Elle se détermine de la façon suivante (LEMÉE, 1959) :

$$\frac{\text{contenu observé}}{\text{contenu saturé}} \times 100$$

Déficit de saturation hydrique. — Il correspond à la proportion d'eau perdue par la plante quand celle-ci est flétrie. Il s'établit par rapport à la turgescence comme suit :

$$\frac{\text{contenu saturé} - \text{contenu observé}}{\text{contenu saturé}} \times 100$$

Détermination de l'état hydrique des Coleus au point de flétrissement

Séries de terres	Turgescence relative	Déficit de saturation hydrique
a) au point de flétrissement temporaire :		
Mélange standard	93,36	6,64
Limon	94,60	5,40
b) au point de flétrissement permanent :		
Mélange standard	88,74	11,26
Limon	85,35	14,65

IV. Arrosages expérimentaux

Matériel expérimental. — Les essais qui suivent ont tous été effectués avec des boutures enracinées de *Coleus blumei* « Golden Bedder » empotées dans des pots ronds en plastique rigide, perforés à la base. Ces pots ont les dimensions suivantes :

Hauteur =	7,5 cm.
Diamètre supérieur =	6,2 cm.
» à la base =	4,0 cm.
Volume =	180 cm^3
Surface de terre au niveau supérieur du pot =	30 cm^2

a) Effet des arrosages uniformes sur la croissance des Coleus cultivés dans des terres différentes :

Au cours des essais précédents concernant la culture des *Coleus* dans des milieux humidifiés près du point de flétrissement ou de la rétention totale, les arrosages ont été appliqués avec des doses non contrôlées. Le seul objectif étant de maintenir les onze terres à deux états hydriques bien déterminés et d'en suivre les effets sur la végétation.

Dans cet essai, les *Coleus* cultivés pendant un mois ont reçu au total 80 ou 160 millimètres d'eau, c'est-à-dire 20 et 40 millimètres par semaine.

Afin que ces quantités d'eau soient parfaitement bien réparties sur la surface entière de chaque pot, les arrosages ont été faits individuellement, pot après pot, avec une pipette graduée permettant de répartir l'eau goutte à goutte, régulièrement sur toute la surface des pots.

Comme la surface des récipients est de 30 cm^2, chaque apport de 3 cm^3 d'eau par pot correspond à une pluie de 1 mm.

Après un mois de culture expérimentale, nous avons procédé à la mensuration des plantes. Il est intéressant de relever que les *Coleus* se développent approximativement de la même façon et atteignent à peu près la même hauteur dans des terres de caractères aussi opposés que la tourbe et le sable ; tant en régime relativement sec qu'en régime humide.

Développement des Coleus arrosés avec des quantités d'eau égales
(moyennes des hauteurs en cm.)

Milieux de culture	Régime hydrique mensuel 80 mm.	160 mm.
Tourbe	33	33
Sapinette	26	37
Mélande standard	30	32,5
Terreau un an	25	31
Terreau deux ans	24	35
Mélange horticole	28	31,5
Terre franche	25	35
Terre de bruyère	26	34,5
Limon	27	35,5
Sable	31	35
Terre graveleuse	26	28

La hauteur moyenne des *Coleus* ayant reçu 80 mm de pluie en un mois est de 27,5 cm environ tandis qu'avec 160 mm elle varie autour de 33,5 cm.

En outre, et ceci est remarquable, si l'on examine la grandeur des plantes cultivées dans les sols essentiellement organiques (tourbe, sapinette, mélange standard, terreaux de un et deux ans) on constate qu'elle est pratiquement la même que dans les terres minérales (terre franche, limon, sable, terre graveleuse). Ceci malgré la grande différence existant entre les types de ces deux catégories de terres.

b) Prédisposition des Coleus au flétrissement selon les milieux de culture :

En laissant à eux-mêmes des *Coleus* placés dans les onze terres à la rétention totale, nous avons remarqué que les plantes cultivées dans les terres organiques ne disposent pas d'une réserve d'eau supérieure à celles cultivées dans les terres minérales ; le point de flétrissement apparaissant pratiquement en même temps dans ces deux types de sol.

c) Quantités d'eau d'arrosage permettant de rétablir la turgescence :

En nous basant sur les résultats du paragraphe précédent, nous avons essayé de vérifier si l'on peut rétablir la turgescence avec des quantités d'eau uniformes.

En essayant de réduire ces apports d'eau au minimum, nous constatons qu'il est possible de ramener des *Coleus* flétris à la turgescence avec des doses d'eau extrêmement faibles qui sont les mêmes pour des terres aussi opposées que la tourbe et le sable. Cette quantité minime d'eau est proche du déficit de saturation hydrique.

Si l'on considère que le déficit de saturation hydrique (DSH) d'un *Coleus* au point de flétrissement permanent est approximativement de

10 % et que la même plante contient 93 % d'eau, en moyenne quand elle est turgescente, on constate qu'il faut restituer 0,93 cm³ d'eau à un *Coleus* pesant 10 g pour qu'il redevienne turgescent.

Théoriquement, pour qu'une plante reprenne momentanément sa turgescence, il suffit que cette quantité d'eau soit au moins égale au déficit de saturation hydrique.

Fig. 4. — *Coleus* utilisés pour l'étude du déficit de saturation hydrique.
A gauche : état de la plante avant l'apport d'eau.
A droite : la même plante turgescente après un apport de 3 cm³ d'eau.

Pratiquement, à la quantité d'eau permettant de combler le déficit hydrique, il faut joindre la quantité d'eau plus ou moins importante retenue par la terre entre la surface du sol et le système radiculaire.

D'après nos essais, cet eau de cheminement peut être assez faible puisqu'on arrive à réhydrater des *Coleus* mesurant 20 cm de hauteur, d'un poids moyen de 15 g (parties aériennes) avec 3 cm³ d'eau au lieu de 1,9 théorique.

d) Cultures dans des pots spéciaux :

Le comportement des *Coleus* arrosés avec des quantités d'eau minima soulève un problème relatif à l'absorption des solutions du sol par les racines.

Lorsqu'on répartit 3 cm³ d'eau sur le pot d'un *Coleus* flétri, la terre est humidifiée sur une très faible épaisseur. De ce fait, bien que le système radiculaire soit dispersé, également dans toute la masse de terre, il n'y a que les racines superficielles qui bénéficient de cet apport d'eau ; les racines du fond en sont privées et restent dans une partie du sol demeurée au-dessous du point de flétrissement

Pourtant, les Coleus fanés reprennent leur turgescence. Il faut donc admettre que la plante peut s'alimenter en eau sans inconvénient avec une partie seulement de ses racines.

D'autre part, en obligeant le système radiculaire à se concentrer dans des pots très plats, ou d'un très petit volume, on doit permettre à des Coleus flétris de reprendre leur turgescence avec un apport d'eau à peine supérieur à la quantité d'eau représentée par le déficit de saturation hydrique.

Nous avons essayé de préciser ces observations en réalisant des cultures très délicates (DUPERREX, 1963 [2]) dans des pots avec deux humidités différentes et dans des récipients de dimensions très réduites

1. — *Comportement de* Coleus blumei « *Golden Bedder* » *dont le système radiculaire est soumis à deux humidités différentes.*

FIG. 5. — *Coleus blumei* « Golden Bedder » avec système radiculaire divisé en deux parties. *A gauche :* au début de l'essai. — *A droite :* après un mois de culture.

Le but de cet essai est de vérifier dans quelle mesure des irrigations mal réparties influencent les organes aériens des *Coleus*.

La culture a été entreprise dans la tourbe et dans le sable avec des boutures de 15 cm de hauteur. Après avoir lavé soigneusement les racines, la base de la tige a été fendue au scalpel sur une longueur de 3 cm. Pour chaque bouture les deux moitiés enracinées ont été plantées individuellement dans un pot de plastique rigide ; les deux pots sont garnis de la même terre, mais l'un est arrosé régulièrement, tandis que l'autre est privé d'eau. Chaque bouture de *Coleus* est disposée à cheval sur deux pots maintenus ensemble par un fort élastique.

Les *Coleus* tenus en serre à 19 ± 5° C, sont irrigués copieusement au départ et de façon égale afin d'assurer une vigoureuse croissance des racines

Après une dizaine de jours de culture normale, l'un des pots n'est plus irrigué (« pot sec »), tandis que l'autre (« pot humide ») est arrosé chaque jour avec une solution nutritive à 0,5 g d'engrais (N.P.K.) par litre d'eau. L'alimentation en eau était ainsi assurée seulement par l'une des moitiés du système radiculaire.

Environ quatre jours plus tard, les *Coleus* soumis à ce traitement ne présentent aucun signe de flétrissement.

Après un mois, les plants ainsi traités ont un port toujours régulier qui ne signale nullement l'opération faite à la base de la tige au système radiculaire. Ils ont approximativement doublé de volume avec une croissance comparable à celle des plants normaux.

Contrairement à notre attente, aucune des feuilles se trouvant au-dessus du pot sec, n'a manifesté le moindre flétrissement. Elles étaient aussi turgescentes que celles situées du côté de la terre humide. De la base au sommet des tiges, les feuilles sont toujours restées turgescentes, même au cours des journées particulièrement lumineuses ; il n'y a pas eu de carence alimentaire et aucune feuille ne s'est détachée.

Le cas des bourgeons axillaires situés à la base de la tige est intéressant. Bien que placés par paires, chacun sur une des deux moitiés longitudinales de la base de la tige, ces deux bourgeons opposés se sont développés simultanément en parallèle ; l'un, côté « pot humide », étant nourri par une sève minérale montante, l'autre, côté « pot sec », étant alimenté inévitablement par une sève minérale descendante.

En revanche, les systèmes radiculaires se sont révélés différents. Dans le « pot sec », l'absence d'eau a arrêté la croissance des racines, tandis que dans le pot humide, leur croissance a continué.

A la fin d'un mois de culture en pots jumelés, les quantités d'eau contenues dans ces terres, calculées en pour cent par rapport aux terres séchées à 105° C, s'élèvent aux chiffres suivants :

Tourbe de Hollande :	pot humide ..	853 %	Sable :	pot humide	27 %
	pot sec	41 %		pot sec	0,6 %

Dans les pots humides, les terres sont donc restées en permanence à proximité de la rétention totale tandis que dans les pots secs elles se sont maintenues au point de flétrissement permanent.

En résumé, on constate que l'alimentation en eau chez *Coleus blumei* « Golden Bedder » se fait aussi bien latéralement de tissu à tissu que dans le sens normal par l'intermédiaire du système vasculaire. La plante privée subitement de la moitié de ses racines actives n'a pas été troublée dans son développement.

On comprend ainsi que les *Coleus* flétris recevant de l'eau seulement au niveau de leurs racines superficielles, rétablissent leur turgescence malgré qu'une grande partie du système radiculaire, situé dans les couches plus profondes, soit dans une terre sèche.

2. — *Comportement de* Coleus blumei « *Golden Bedder* » *cultivé dans des récipients de dimensions très réduites.*

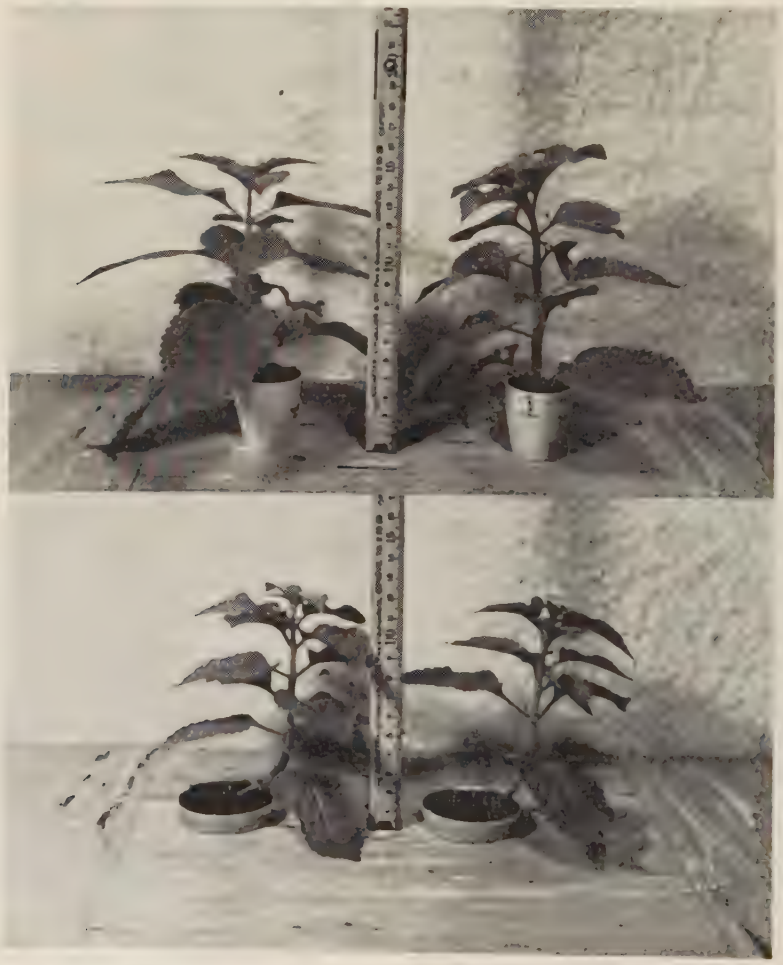


Fig. 6. — Cultures expérimentales de *Coleus* dans des récipients de dimensions très restreintes par rapport au volume des plantes.

Comme les Coleus flétris sont capables de reprendre leur turgescence en absorbant l'eau qui leur manque, uniquement avec quelques-unes de

leurs racines situées près de la surface du sol, nous avons pensé qu'il est possible en utilisant des pots spéciaux d'effectuer des arrosages avec des quantités d'eau très restreintes, se rapprochant des quantités correspondant au déficit de saturation hydrique.

Pour cela, nous avons réalisé des cultures avec deux types de pots ayant des dimensions très restreintes par rapport au volume des parties aériennes des plantes servant aux expériences.

a) *Pots plats.* — Ces pots en forme de soucoupe ont les dimensions suivantes :

Hauteur = ...	1 cm.	Volume = ...	15 cm^3
Diamètre = ...	5 cm.	*Surface occupée par la terre* = ...	*20 cm^2*

b) *Pots en forme de godet.* — Il s'agit de creusets de Gooch en porcelaine dont la base est percée de petits trous. Ces creusets ont les dimensions suivantes :

Hauteur = ...	4 cm.	Volume = ...	23 cm^3
Diamètre = ...	3,5 cm.	*Surface occupée par la terre* = ..	*9,6 cm^2*

Les plantes mises dans ces pots ont été arrosées avec une quantité d'eau égale à 1 mm de pluie, soit 1 cm^3 d'eau sur 10 cm^2.

Bien qu'excessivement faible, cette dose permet aux *Coleus*, dans la tourbe et le sable, de rétablir leur turgescence. Nous avons encore abaissé la dose à 0,65 cm^3 par plante, mais lorsqu'on donne cette quantité d'eau à des *Coleus* fanés, il n'y en a qu'un sur deux qui récupère sa turgescence.

Il faut donc pratiquement la même quantité d'eau pour rétablir la turgescence d'un *Coleus* flétri cultivé dans un mélange spongieux, essentiellement organique, comme la tourbe ou dans un sol entièrement minéral, tel que le sable.

V. Absorption de l'eau par le feuillage avec humidification consécutive des sols :

L'humidification du sol à la suite d'absorption d'eau par le feuillage est un phénomène admis par plusieurs auteurs dont ZAMFIRESCU (1931), BREAZEALE et ses collaborateurs (1950, 1951, 1953), mais considéré comme incertain par d'autres, notamment HAINES (1952), HÖHN (1954), WIERSMA et VEIHMEYER (1954).

BREAZEALE et ses collaborateurs ont pulvérisé de l'eau sur des tomates cultivées dans des récipients fermés à leur partie supérieure avec de la cire d'abeille. Ils ont appliqué les pulvérisations quand les plantes commençaient à se flétrir, c'est-à-dire quand le sol se trouvait au point de flétrissement. 48 heures après les applications d'eau, les plantes étaient turgescentes et la terre accusait un état hydrique supérieur au point de flétrissement. Afin de vérifier cette constatation, les auteurs ont procédé à de nouveaux essais en plantant des tomates dans des flacons d'Erlenmeyer vides. En pulvérisant régulièrement de l'eau sur le feuillage, ils ont constaté que les racines exsudaient de l'eau. HAINES ayant critiqué cette méthode en disant que l'eau supplémentaire provenait certainement de la condensation, BREAZEALE et Mc GEORGE ont refait l'expérience en mettant cette fois les tomates dans des flacons d'Erlenmeyer pleins d'eau, reliés à un tuyau vertical faisant

fonction de manomètre. Ils ont remarqué que la quantité d'eau augmentait. D'après WIERSMA et VEIHMEYER, cette augmentation du volume d'eau proviendrait du gonflement des tissus et de la production de gaz par les racines.

A la suite de ces constatations, Madame J. TRONCHET (1959) a observé à plusieurs reprises que le sable sec utilisé comme support pour la culture expérimentale des cuscutes, s'humidifie et s'agglomère autour de la base « radiculaire ». Il semble bien dans ce cas, comme dans les essais de BREAZEALE et ses collaborateurs, que l'eau non immédiatement utilisée pour les besoins de la croissance puisse dégorger vers la base.

Devant les problèmes posés par la circulation inverse de l'eau, en sens basipète, dans les plantes, nous avons entrepris des essais avec des *Coleus blumei* « Golden Bedder ».

Nous avons empoté des plantes âgées d'un mois dans des flacons de plastique étanche, avec nos onze terres expérimentales. Après trois semaines de culture à 19 ± 3° C, les plantes en pleine croissance n'ont plus été arrosées ; pendant 4-5 jours elles ont vécu avec l'eau en réserve dans la terre, puis elles ont manifesté le premier point de flétrissement. Dès que celui-ci fut bien marqué, nous avons dosé l'eau des terres (nombres de la première colonne du tableau).

Nous avons ensuite soigneusement obturé les flacons de culture ; le couvercle de plastique imperméable fendu et troué pour le passage de la tige a été scellé avec une double bande de cellulose auto-collante, tandis que l'orifice du passage de la tige a été colmaté avec de la cire à greffer plastique (BÆRTSCHI'S). Parallèlement, nous avons préparé des flacons témoins sans plantes, mais pleins des mêmes terres au point de flétrissement accusé et dont nous avons dosé l'eau (nombres de la troisième colonne du tableau).

Ainsi fermés, les flacons avec et sans *Coleus* au point de flétrissement accusé sont placés dans une serre à 22 ± 1° C avec une humidité relative maintenue au-dessus de 95 %. Bien que l'air fût pratiquement saturé d'eau, les *Coleus* sont restés dans le même état morphologique ; après 5 jours, les plantes étaient encore flétries, elles n'avaient repris aucune turgescence. Nous avons refait cette expérience avec des *Coleus* au point de flétrissement temporaire et même à ce stade les plantes n'ont pas manifesté la moindre reprise de turgescence.

Ensuite, les *Coleus*, toujours flétris, sont aspergés quatre fois par jour avec un atomiseur pour que le feuillage soit mouillé sur toutes ses faces.

Après 24 heures, on notait un léger début de turgescence et entre 48 et 72 heures les plantes étaient aussi fraîches que si elles avaient été arrosées. La répétition de cet essai donne chaque fois le même résultat.

Les flacons, avec et sans *Coleus*, ont été ouverts 12 jours plus tard pour le dosage de l'eau. Voici les moyennes de chaque série, calculées en pour cent par rapport à la terre séchée à 105° (deuxième et quatrième colonnes du tableau).

Eau dans les terres

Terres	avec Coleus		sans Coleus	
	avant aspersion	après aspersion	avant aspersion	après aspersion
Tourbe	94,79	117,62	67,90	65,27
Sapinette	51,78	66,62	33,25	31,79
Mélange standard	51,84	84,99	51,58	42,36
Terreau 1 an	28,29	45,63	30,42	30,32
Terreau 2 ans	26,23	31,87	25,06	29,40
Mélange horticole	9,72	22,28	9,40	8,71
Terre franche	9,69	30,34	10,13	8,36
Terre de bruyère	9,82	18,84	9,01	8,56
Limon	4,89	9,92	3,03	2,66
Sable	0,54	3,22	0,95	0,85
Terre graveleuse	1,05	5,52	1,41	1,35

A la fin de l'essai, lorsque les aspersions d'eau sont arrêtées, tous les *Coleus* se flétrissent temporairement, même ceux dont les racines sont en contact avec de la terre humide dont la teneur en eau est au-dessus du point de flétrissement. Cependant, les feuilles des plantes dont le sol est assez mouillé redeviennent turgescentes un à trois jours plus tard.

Tout se passe donc comme si la circulation des solutions cellulaires, inversée à la suite des aspersions, changeait à nouveau de direction pour redevenir normale, ce phénomène physiologique demandant un certain temps pour s'accomplir.

Chapitre VII

EAU DANS LES TERRES PAR RAPPORT AU VOLUME

Les calculs de la quantité d'eau contenue dans les sols par rapport au volume exploré par les racines sont de toute première importance au point de vue pratique. Ils permettent de connaître les réserves d'eau mises à la disposition des plantes et de fixer les normes d'arrosage.

Ces calculs font appel aux principales données physiques et hydriques étudiées dans les chapitres précédents, soit la densité apparente da, la rétention totale Hr et le point de flétrissement physiologique Hf.

Pour établir les réserves d'eau dans nos onze terres expérimentales, par rapport à la hauteur h du sol prospecté par les racines, nous avons adopté la formule utilisée d'une façon classique (Duchaufour, 1960). $\frac{h\ da}{100}$ (Hr - Hf). En appliquant cette formule aux différentes caractéristiques hydriques de nos onze terres expérimentales, on obtient des chiffres qui confirment d'une façon remarquable les résultats enregistrés en étudiant la prédisposition des *Coleus* au flétrissement (p. 64). et en déterminant les quantités d'eau d'arrosage permettant de rétablir la turgescence (p. 65).

Réserves d'eau dans les terres

Terres	gr. ou cm³ d'eau dans un dm³ de terre à la rétention totale	au point de flétrissement	utilisable totale
Tourbe	386	47	339
Sapinette	353	112	241
Mélange standard	650	190	460
Terreau un an	546	175	371
Terreau deux ans	474	167	307
Mélange horticole	660	180	480
Terre franche	507	178	429
Terre de bruyère	334	129	205
Limon	417	58	359
Sable	331	21	310
Terre graveleuse	234	39	195

Les réserves d'eau contenues dans les terres organiques et dans les terres minérales présentent une grande ressemblance.

Il est surtout intéressant de remarquer que la quantité d'eau totale retenue par les différentes terres expérimentales est en moyenne de

326 cm^3 par dm^3 de terre se trouvant à la rétention totale. En outre, si l'on compare la tourbe, milieu constitué entièrement de débris organiques et dont la rétention totale par rapport au poids est de 899 %, au sable, composé uniquement d'éléments minéraux très fins et dont la rétention totale par rapport au poids est seulement de 23 %, on constate que ces deux terres ont pratiquement la même réserve d'eau utilisable ; les plantes disposent en effet par litre de terre de 339 cm^3 d'eau dans la tourbe et de 310 cm^3 dans le sable. Le mélange standard, essentiellement organique, et le mélange horticole, contenant beaucoup de matières minérales ont aussi à peu près les mêmes réserves d'eau.

Il est donc normal que les *Coleus* se trouvant dans ces milieux divers se flétrissent pratiquement ensemble puisque les réserves d'eau qu'ils ont à leur disposition sont les mêmes à très peu de chose près.

En utilisant les chiffres correspondant aux réserves d'eau contenues dans nos terres expérimentales, nous avons établi d'une part, les quantités d'eau nécessaires pour mouiller les terres jusqu'à 10 cm de profondeur, sur 1 dm^2 ou sur 1 m^2 de surface, et d'autre part, l'épaisseur de terre humidifiée avec une chute d'eau égale à 10 mm.

Nous avons exécuté ces calculs en nous fondant sur les quantités d'eau contenues dans les terres au point de flétrissement indiqué par *Coleus blumei* « Golden Bedder », puis nous avons déterminé les normes ci-dessus (la quantité d'eau pour humidifier une couche de terre de 10 cm et l'épaisseur de terre humidifiée avec 10 mm d'eau) afin d'obtenir des sols humides à la rétention totale et au point de ressuyage au « champ ».

Eau pour humidifier une couche de 10 cm. de terre et épaisseur de terre humidifiée avec 10 mm. d'eau

A la rétention totale :

Terres	% d'eau à la rétention totale	l. d'eau pour humidifier 10 cm. de terre s/1 m^2	mm. de terre humidifiée avec 10 mm. d'eau
Tourbe	899	33,9	29
Sapinette	254	24,1	41
Mélange standard	301	46,0	22
Terreau un an	156	37,0	27
Terreau deux ans	99	30,7	32
Mélange horticole	88	48,0	21
Terre franche	57	32,9	30
Terre de bruyère	53	20,5	48
Limon	36	35,9	28
Sable	23	32,0	31
Terre graveleuse	12	19,5	51

Au point de ressuyage au « champ » :

Terres	% d'eau au champ	l. d'eau pour humidifier 10 cm. de terre s/1 m²	mm. de terre humidifiée avec 10 mm. d'eau
Tourbe	480	14,3	70
Sapinette	180	13,8	72
Mélange standard	140	11,2	89
Terreau un an	85	12,1	82
Terreau deux ans	70	16,8	60
Mélange horticole	39	11,2	89
Terre franche	31	9,7	103
Terre de bruyère	45	13,3	75
Limon	19	16,2	62
Sable	10	12,3	81
Terre graveleuse	7	9,7	103

L'examen des chiffres permet de constater que les réserves d'eau des différentes terres, déterminées par rapport à la rétention totale ou au point de ressuyage au « champ », présentent peu de variations.

L'humidification d'un m² de sol, sur 10 cm de profondeur demande, en moyenne, 32 litres d'eau pour amener la terre à la rétention totale et 12 litres pour le point de ressuyage.

Si l'on prend l'exemple de la tourbe et du sable, qui sont deux sols très opposés, l'un représentant le milieu caractéristique des régions pluvieuses et l'autre celui des contrées arides, on constate qu'il faut pratiquement les mêmes quantités d'eau pour les humidifier. On obtient la rétention totale de la tourbe avec 33,9 l au m² et celle du sable avec 32 l. Pour le point de ressuyage il faut respectivement 14,3 et 12,3 l au m².

On trouve aussi une ressemblance semblable notamment entre le mélange standard, essentiellement organique, et le mélange horticole de composition fortement minérale.

Afin de vérifier la valeur des chiffres concernant la couche de terre humidifiée avec 10 mm d'eau, nous avons comparé les résultats obtenus par le calcul avec ceux observés dans les colonnes de terre irriguées par gravité (p. 30).

Dans les deux cas il s'agit de terre séchée à l'air et ramenée au point de ressuyage au « champ ».

Epaisseur de terre humidifiée
(résultats comparatifs entre les calculs et les observations)

Terres	mm. de terre humidifiée avec 10 mm. d'eau	
	Calcul	En observant les arrosages
Tourbe	56	hydrophobe
Sapinette	42	»
Mélange standard	36	»
Terreau un an	38	»
Terreau deux ans	34	»
Mélange horticole	39	41
Terre franche	41	41
Terre de bruyère	41	42
Limon	47	49
Sable	71	78
Terre graveleuse	79	82

Ces derniers résultats permettent de constater que le calcul des volumes de terre humidifiée donne des chiffres qui sont très proches de la réalité, spécialement en ce qui concerne les terres minérales.

En revanche, on ne peut pas faire le même rapprochement avec les calculs relatifs aux terres organiques. En raison de leur hydrophobie très marquée, ces terres ont à l'égard de l'eau un comportement imprévisible lorsqu'elles sont sèches.

RESUME ET CONCLUSIONS GENERALES

Le but de ce travail est d'étudier le comportement des sols organiques et minéraux à l'égard de l'eau en utilisant des méthodes physiques et physiologiques.

Nous avons rassemblé pour nos recherches onze sols ayant des propriétés très opposées : sols alcalins ou acides, avec ou sans chaux, grossiers ou fins, riches ou pauvres en matières organiques, d'une densité apparente faible ou élevée.

Nous avons constaté que les méthodes utilisées couramment pour mesurer l'eau dans les terres agricoles ne sont pas directement applicables aux sols organiques. De même, les plantes-tests classiques ne permettent pas de mesurer le point de flétrissement dans les sols acides ou salins.

Au cours de nos recherches, nous avons découvert une plante-test très souple ayant l'avantage de permettre la mesure du point de flétrissement dans toutes les terres; il s'agit de *Coleus blumei*, Benth. « Golden Bedder ». Cette plante se développe dans les conditions les plus diverses et elle se multiplie par bouturage ce qui permet d'obtenir un matériel expérimental homogène.

Nous avons d'abord étudié nos sols expérimentaux du point de vue physico-chimique, puis nous avons déterminé pour chacun les principales constantes hydriques : rétention totale, point de ressuyage, point de flétrissement, eau hygroscopique, par les mesures physiques et physiologiques avec *Coleus* comme plante-test.

A l'aide de ces constantes, nous avons établi la relation entre l'eau et les sols par rapport à leur poids ou à leur volume.

L'irrigation expérimentale par capillarité ou par gravité montre que les sols organiques ont une hydrophobie très prononcée. Nous avons également étudié l'action capitale des solutions salines sur le point de flétrissement et la résistance des *Coleus* en présence de solutions de différentes pressions osmotiques.

Les résultats de nos cultures expérimentales de *Coleus* placés dans des terres maintenues plus ou moins saturées d'eau montrent qu'une teneur en eau proche de la rétention totale assure une végétation plus luxuriante qu'une teneur en eau voisine du point de flétrissement.

En effectuant des arrosages expérimentaux, nous avons constaté deux faits très importants : avec des quantités égales d'eau, la croissance des *Coleus* est approximativement la même dans tous les sols expérimentaux; en réduisant les apports d'eau au minimum il est possible de ramener des *Coleus* flétris, cultivés dans des pots spéciaux, à la turgescence avec des doses voisines du déficit de saturation hydrique qui sont les mêmes pour toutes les terres. Nos calculs montrent que la quantité d'eau à la disposition des plantes, dans les sols organiques ou minéraux, se révèle être toujours assez proche du tiers du volume de la terre.

Ainsi, nous avons trouvé une grande concordance entre les indications obtenues avec les mesures hydriques des sols et les observations expérimentales enregistrées avec *Coleus blumei* « Golden Bedder ».

BIBLIOGRAPHIE

American Society Testing Materials (1948) — Standard Method of Test for Centrifuge moisture equivalent of soils. 61-63, Specific gravity of soils 70.

Aubert G. et Duchaufour Ph. (1956). — Projet de classification des sols, C. R. 6e Congr. intern. Sci. Sol Paris, **5**, 97, 597, 604.

Baver L.D. (1948). — Soil physics N.-Y.

Bethlahmy N.A. (1952). — A Method for approximating the water content of soils. Trans. Am. Geophys. Union **33**, 699-706.

Bladergroen W. (1943). — Chimie physique médicale, 227.

Blanchet R., Chaumont C. et Studer R. (1962). — Alimentation phosphorique des plantes et phénomène de contact racines-particules de sol. Ann. agron. **13**, (1), 21-29.

—— (1962). — Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. Ann. agron. **13** (2), 93-110.

Bœuf F. (1936). — Les bases scientifiques de l'amélioration des plantes. Paris.

—— et Vessereau A. (1948). — Méthodes statistiques en biologie et en agronomie, Paris.

Bordas J. et Mathieu G. (1930). — Recherches sur la force de succion des sols et l'irrigation souterraine. Ann. Sci. agron. **2**, 192-235.

Bossard R. (1960). — Cultures florales, Nébulisation ou Mist-system, Paris.

Bouyoucos G.J. (1929). — A new simple and rapid method for determining the moisture equivalent of soils and the role of soil colloids on this moisture equivalent. Soil Sci. **27**, 233-41.

—— (1935). — A comparaison between the suction method and the centrifuge method for determining the moisture equivalent of soils. Soil Sci. **40**, 165-171.

—— (1949). — Nylon electrical resistance unit for continuous measurement of soil moisture in the field, Soil Sci. **67**, 319-330.

—— (1954). — Electrical resistance methods as finally perfected for making continuous measurement of soil moisture content under field conditions. Quart. Bull. Mich. agric. Expt. Sta. **37**, 132-149.

—— (1962). — Hydrometer method improved for making particule size analyses of soils, Agron. J., U.S.A. **5**, 465.

—— et Mick A.H. (1940). — An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions. Mich. agric. Exp. Sta. Techn. Bull. **172**.

Breazeale E.L. et Mc George W.T. (1949). — A new technic for determining wilting percentage of soil. **68**, 371-374.

—— (1953). — Exudation pressure in roots of tomato plants under humid conditions. Soil Sci. **75**, 293.

—— et Breazeale J.F. (1950). — Moisture absorption by plants from an atmosphere of high humidity, Plant Physiology, **25**, 413.

—— (1951). — Movement of water vapor in soils. Soil Sci. U.S.A., **71**, 181-185.

—— (1951). — Water absorption and transpiration by leaves, Soil Sci. **72**, 239.

Briggs L.J. (1897). — The mechanics of soil moisture, U.S. Dep. Agric. Bur. Soils Bull. **10**.

—— et Mc Lane J.W. (1907). — The moisture equivalent of soils. U.S. Dep. Agric. Bur. Soils Bull. **45**, 1-23.

—— et Shantz H.L. (1912). — The witting coefficient for different plants and its indirect determination. U.S. Dep. Agric. Bur. of Plant Indus. Bull. **230**.

Bronislav G.E. (1962). — Dynamics of water content and the rate of respiration of spring wheat leaves. Act. soc. Bot. Poloniae, XXXI, **4**, 617-619.

Bürger H. (1922). — Physikalische Eigenschaften der Wald und Freilandböden, Mitt. eidg. Anst. f.d. forstl. Versuchw. XIII, **1**.

Burov D.T. (1952). — (Evaporation de l'eau par le sol nu et par le sol sous végétation dans les régions transolgiennes) Pochvovedenie, **1**, 41-52.

Burrow W.C. et Kirkham D. (1958). — Measurement of field capacity with a neutron-meter. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22, 103-105.

Byron S. (1952). — Soil Physical conditions and Plant Growth. II, N. Y.

Carrante V. (1963). — Résistance de la vigne à la sécheresse. Bull. O. I. V. **36**, 384.

Chastain A. (1952). — Recherches écologiques et floristiques sur le « Pinetum » de la haute tourbière de la Vraconnaz (Thèse). Trav. Inst. Bot. Université de Montpellier.

Chatfield C. et Adams G. (1940). — Proximate composition of American food materials U. S. Dept. Agric. Circ. **549**, 1-91.

Coffman B.S. (1960). — Symposium on nuclear methods for measuring soil density and moisture A.S.T.M. spec. tech. Publ. U.S.A. **293**, 1-2.

Coile T.S. (1953). — Moisture content of small stone in soil, Soil Sci. **75**, 203-207.

Coleman J.D. et Marsh A.D. (1961). — An investigation of the pressuremembrane method for measuring the suction properties of soil. J. Soil. Sci. G.B. **12**, 343-62.

Colman E.A. (1947). — A Laboratory procedure for determining the field capacity of soils. Soil Sci. **63**, 277-283.

—— et Hendrix T.M. (1949). — The Fiberglass electrical soil moisture instrument. Soil Sci. **67** (6), 425-438.

Combeau A. (1960). — Observations sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF. Serv. cartogr. de l'ORSTOM, Paris.

—— Ollat C. et Quantin P. (1961). — Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. Relations entre les rendements et les résultats d'analyses des sols. In « Fertilité » ORSTOM, **1**.

Crafts A.S., Currier H.B. et Stocking G.R. (1949). — Water in the Physiology of plants. Waltham, U.S.A.

Damagnez J. (1960). — Le sol, l'eau et la plante. La Tunisie Agricole (mars).

Demolon A. (1941). — Croissance des végétaux cultivés, II. Dunod, Paris.

—— (1948). — Dynamique du sol, I, Dunod, Paris.

Deshusses L.A. et Duperrex A. (1951) (1). — Culture sans terre et arosages automatiques en horticulture. Bull. Inst. nat. Genevois T. LIV. 38-75.

—— (1951) (2). — Etudes des techniques culturales en floriculture. Rev. Hort. Suisse **12**, 366-370.

—— (1952) (1). — Cultures florales dans des milieux de structure définie; recherche d'un milieu standard de culture. Rep. of the Thirteenth Inter. Hortic. Congr. 455-462.

—— (1952) (2). — Culture sans terre de l'œillet américain. Rep. of the Thirteenth Inter. Hortic. Congr. 463-467.

—— (1953). — Amendements synthétiques. Rev. Hort. Suisse **6**, 168.

—— et *Hatt* P. (1951). — Etude sur la technique des arrosages, Rev. rom. agric. vit. et arb. **1**, 1-4.

Dirks B. et Scheffer F. (1933). — Akt. II. Int. Kunstdüngerkonferenz, Berlin 27.

Dommergues Y. (1960). — Minéralisation de l'azote aux faibles humidités, 7e Ciss. Madison II, 672-678.

Duchaufour Ph. (1960). — Précis de Pédologie, Masson, Paris.

—— Bonneau M. et Lacaze J.F. (1961). — Evolution du profil hydrique d'un sol forestier en fonction de différents modes de travail du sol. A.F.E.S. (spécial), 44-53.

Duclaux J. (1934). — Capillarité (Act. Sci. et industr.) IV. Hermann, Paris.

Duperrex A. (1955). — Bacs de culture à irrigation souterraine pour plantes d'appartement. Rev. Hort. Suisse, **12**, 388-391.

—— (1960). — La Suisse en fleurs, Avanti-Club, Neuchâtel.

—— (1962) (1). — *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder » plante-test pour la mesure de l'eau du sol au point de flétrissement. C. R. Acad. Sc. **254**, 1481-1482.

—— (1962) (2). — Eau contenue dans *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder » placé dans différents milieux. C. R. Acad. Sc. **255**, 558-560.

—— (1962) (3). — *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder » plante-test permettant de mesurer l'influence des solutions salines sur le point de flétrissement. C. R. Acad. Sc. **255**. 2647-2649.

—— (1962) (4). — Mesures du point de flétrissement des sols au moyen de *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder ». Ann. Sci. Univ. Besançon, 2e, Botanique, **18**, 149-159.

—— (1962) (5). — Applications à l'horticulture des acquisitions récentes de la physiologie végétale. Bull. Soc. Hist. nat. du Doubs, **64**, 2, 33-40.

—— (1962) (6). — Plantes d'appartement, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel-Paris.

—— (1963) (1). — Absorption d'eau par le feuillage de *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder » avec humidification consécutive des sols. C. A. Acad. Sci. **256**, 3183-3185.

—— (1963) (2). — Comportement de *Coleus blumei* Benth. « Golden Bedder » dont le système radiculaire est soumis simultanément à deux humidités différentes. C. R. Acad. Sc. **256**, 3739-3741.

—— (1963) (3). — Eau contenue dans les sols et fructification des champignons supérieurs. Bull. Soc. Bot. Suisse **73**, 218-226.

Durand J.H. (1961). — Les besoins en eau des plantes. Aspect pédologique. A.F.E.S. **6-7**, 296-319.

Enderle W. (1951). — Tagesperiodische Wachstums und Turgoschwankungen an gewebekulturen. Planta (Berl.) **39**, 570-588.

Esselen D.J. (1937). — Citrus irrigation practices, with special reference to soil moisture studies in two orchards in the Eastern Transvaal. Union South Afr. Agric. a Forestry Sci. Bull. **159**.

Feodoroff A. (1961). — Influence des propriétés structurales sur la pénétration de l'eau dans un sol sec. C. R. Ac. Agricult. France, **4**, (47), 164-168.

—— (1961). — Capacité de rétention pour l'eau et structure du sol. C. r. Ac. Sci. Paris **252**, 591-593.

—— (1962). — Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. Ann. agron. **13** (6), 523-547.

—— (1962). — Rétention de l'eau dans le sol et emprisonnement d'air (effet de non mouillabilité et rôle de la matière organique). C. r. Ac. Agricult. France **48** (11), 533-536.

—— et Rafi M. (1962). — Evaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Les trois stades de l'évaporation. C. r. Ac. Sci. **255** (23), 3220-3221.

—— (1962). — Evaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Evolution des profils hydriques. C. r. Ac. Sci. **255** (25), 3468-3470.

—— (1963). — Evaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Ann. agron. **14** (4), 601-613.

Franzmeier D.P., Whiteside E.P. et Erickson R.E. (1961). — Relationship of texture classes of fine earth to readily available water. Trans. 7th. Intern. Congr. Soil Sci. Madison, Wis. 1960 I. 354-63.

Furr J.R. et Reeve J.O. (1945). — Range of soil moisture percentage through which plants undergo permanent wilting in some soils from semi-arid irrigated areas. J. Agric. Res. **71**, 149-170.

Gane R. (1941). — The water content of wheats as a function of temperature and humidity. J. Soc. chem. Ind. Lond. **60**, 44-46.

Gely J. (1953). — Mesure électrique de l'humidité des sols. Progr. agr. et vit. **140**, 38-47.

Gerth A. (1962). — Jahreszyklische Untersuchungen über den Wasserhaushalt in einer Braunerde und in einer Schwarzerde. Z. Acker-u, Pflanz. Dtch. **114** (2), 183-198.

Ghorfi (El) N. (1961). — Contribution à l'étude du pH des sols. Cah. Rech. agron., Maroc **12**, 5-18.

Gras R. et Monnier G. (1962). — Contribution des cailloux à la capacité de réserve en eau du sol. C. r. Acad. Sci. Fr. **254** (19), 3422-3424.

Haberlandt G. (1924). — Physiologische Pflanzen-anatomie, Leipzig.

Haines F.M. (1952). — The absorption of water by haves in a atmosphere of high humidity. J. of Exper. Bot. **3**, 95.

Haise H.R., Haas H.J. et Jensen L.R. (1955). — Soil moisture studies of some Great Plains Soils : II. Field capacity as related to 1/3 atm. percentage and « minimum point » as related to 15 and 26 atm. percentages. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. **19**, 20-25.

HALLAIRE M. (1953). — Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés (Thèse). Ann. I.N.R.A. Série A (2), 143-244.

—— (1956). — L'état de l'eau dans le sol et l'alimentation en eau des végétaux. Bull. Soc. fr. de Physiol. vég. **2** (1), 1-17.

—— (1959). — La diffusion de l'eau dans le sol et l'alimentation hydrique des plantes annuelles. Bull. soc. franç. Physiol, vég. **5**, (3), 133-140.

—— (1960). — Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. Ann. Physiol. vég. **2**, 119-130.

—— (1961). — Irrigation et utilisation des réserves naturelles. Ann. agron. **12** (1), 87-97.

—— (1963). — Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. Ann. agron. **14** (4), 393-428.

—— et BALDY Ch. (1963). — Potentiel matriciel de l'eau dans le sol et tension superficielle de l'eau. Ann. agron. **14** (4), 381-391.

HENDRICKSON A.H. et VEIMEYER F.J. (1929). — Irrigation experiments with peaches in California. California Agric. Exper. Stat. Bull. **479**.

—— (1945). — Permanent wilting percentages of soils obstained from field and Laboratory trials. Plant Physiol. **20**, 517-539.

HENIN S. (1960). — Le profil cultural. Soc. Ed. Ing. agric. Paris.

HENRY J. (1962). — Mesure de l'humidité et de la densité des sols. Electron. industr. Fr. **51**, 78-80.

HOHN K. (1954). — Untersuchungen über das Wasserdampfanfnahme — und Wasserdampfabgabe — Vermögen höherer Landpflanzen. Beitr. Biol. Pflanz. **30**, 159.

HOLMES J.W. (1960). — The evaporation of water from bare soils with different tilth. Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci., 1-14.

HUBER B. (1956). — Die Gefässleitung B. Gasembolie und Verkernung. Handb. der Pflanzenphysiologie. W. Ruhland Band III. 562.

HUSSON J.F. (1963). — Le contrôle de l'efficacité des irrigations. Application au maïs. Bull. Techn. Inf. **178**, 149-158.

ISRAELSEN O.W. (1950). — Irrigation Principles and Practices. John Wiley, N.-Y.

KHUDAIRI A.K., ABDUL WAHAB A.S. et THEWANI A.J. (1961). — Plant response to different soil moisture levels. Act. Coll. Madrid (zone aride) XVI. 265-269.

KILLIAN Ch. et LEMEE G. (1956). — Les xérophytes : leur économie d'eau. Handb. Pflanzenphysiologie, W. Ruhland, Band III. 787.

KNIGHT A.H. et WRIGHT T.W. (1954). — La détermination de l'humidité dans le sol au moyen de la diffusion neutronique. Radioisotope Conf. 2. III.

KOPECKY J. (1927). — Investigations of the relations of water to soil. Proc. Intern. Congr. Soil. Sci. **1**, 495-503.

KRAMER P.J. (1949). — Plant and soil water Relationships. N.Y. Mc Graw Hill.

—— (1955). — Water relations of Plant cells and tissues. Ann. Rew. of Plant Phys. **6**, 253.

—— (1962). — Water stress in Plants. Adv. front. of Plant. Sci. **1**, New Delhi (India).

—— et CURRIER H.B. (1950). — Water relations of plant cells and tissues. Ann. Rev. Plant. Physiol, **1**, 265-284.

KRUPSKIJ N.K., ALEKSANDROVA A.M. et GUBAREVA D.N. (1962). — (Mesure des sols d'Ukraine) Pochvovedenie (S.S.S.R.) **4**, 70-78.

KUMMER F.A. et COOPER A.W. (1945). — Soil porosity determinations with air pressure picnometer as compared with tension method. Agr. Eng. **26**, 21-23.

KUTILEK M. (1962). — (Influence de l'homme sur l'eau hygroscopique du sol). Vodohosp. Cas. Geskosl. **10** (3), 321-329.

LANE R.D. et Mc COMB A.L. (1948). — Wilting and soil moisture dep'etion by tree seedlings and gras. J. Forestry, **46**, 344-349.

LAWRENCE W.J.C., NEWEL J. (1950). — Seed and Potting Composts. George Allen et Unwin. London.

LEBEDEFF A.F. (1927). — Methods of determining the maximum moisture holding capacity of soils. Proc. First. Intern. Congr. Soil Sci. **1**, 551563.

—— (1928). — The movement of ground and soil waters. Proc. Intern. Congr., Soil Sci. Ist. Congr. **1**, 459-494.

LEMEE G. (1959). — Le bilan de l'eau des plantes vasculaires dans ses rapports avec l'humidité du sol. Bull. Soc. franç. de Phys. vég. **5** (3), 118.

—— (1959). — Rapports du sol et de la végétation. 1er coll. Soc. bot. de France. Le régime d'humidité du sol, 93-98, Masson, Paris.

—— (1962). — Le bilan d'eau des plantes vasculaires dans ses rapports avec l'humidité du sol. Bull. Soc. Fr. Phys. vég. **3**, 118-132.

—— et ISSENHUTH M. (1959). — Relations entre l'absorption de l'eau par la surface foliaire de Peperomia argyrea et son état de turgescence. Bull. Soc. franç. Phys. vég. **5** (3), 142-143.

—— et LAISNE G. (1951). — La méthode réfractométrique de mesure de la succion. Rev. gén. de Bot. **58**, 336.

MALYSHEV F.A. (1959). — (Dynamique de l'humidité du sol après apport de suspension aqueuse de tourbe) Akad. Nauk. belorussk. S.S.R. Trudy Inst. **8**, 332-342.

MASSON H. (1960). — La rosée et les possibilités de son utilisation. Ann. Ec. Sup. Sci. Dakar, **1**, 3-44.

MAXIMOV N.A. (1929). — The plant in relation to water. Allen et Unwin. London.

MERIAUX S. (1963). — Données sur l'irrigation des prairies temporaires en zone sub-humide. C. r. Acad. agric. de France, **2**, 124-131.

MILLAR C.E. et TURK L.M. (1952). — Fundamental of soil science.

MONNIER G., TURC L. et JEANSON-LUUSINANG J. (1962). — Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. Ann. agron. **13** (1), 55-63.

MOREL R. et RICHER A. (1951). — Relation entre la pluviosité et le taux d'humidité du sol sous différentes cultures. C. r. Acad. agric. de France, **12**, 445-449.

MOURAVIEFF I. (1959). — Tension de succion et déficit de saturation hydrique du tapis végétal des pelouses sèches de la région de Grasse. Bull. Soc. bot. Fr. **106** (7-8), 306-309.

NITSCH J.P. (1961). — Les hormones végétales. L'usine végétale. Kister, Genève, **3**, 87.

OANEA N. (1961). — (Influence de la texture sur la hauteur et la vitesse d'ascension capillaire de l'eau). Lucr. sti. Inst. agron. « N-Balcescu » Ser. A. Romin. **5**, 281-287.

OOSTING H.J. (1956). — The Study of Plant communities. Freeman, London.

OPPENHEIMER H.R. (1954). — Critique expérimentale de deux méthodes employées en vue d'établir le déficit de saturation hydrique (DSH) des feuilles. Proc. 8th Int. Bot. Congr. Sect. 11-12, 218-220.

PAGE J.B. (1947). — Advantages of the pressure pycnometer for measuring the pore-espace of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. **12**, 81-84.

PARCEVAUX S. de (1961). — Tests physiologiques permettant de contrôler l'alimentation en eau des plantes. Ann. agron. **12**, 75-80.

—— (1963). — Transpiration végétale et production de matière sèche, essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. Ann. agron. **14** (5), 655-742.

PELEGRIN P. et BUSCARLET L.A. (1960). — La mesure de l'humidité et de la densité des sols à l'aide des sondes émettrices de neutrons ou de rayons gamma. Bull. Inst. agron. Gembloux II. 854-871.

PENMAN H.L. (1948). — Physics in agriculture. J. of Sci. instr. and of Phys. Industr. **25** (12).

PLAISANCE G. et CAILLEUX A. (1958). — Dictionnaire des sols, Paris.

—— et VAN DER MAREL H.W. (1960). — Contributions à l'étude des limons de la forêt de Chaux. Ann. agr. sér. A **6**, 661-711.

QUAAS R. (1961). — Der Einfluss einiger edaphischer Faktoren auf die « Anwelktranspiration » der Pflanzen. Wissensch. Z. Karl-Marx-Univ. Leipzig, Reihe **19** (3), 393.

QUANTIN A. (1947). — Le comportement écologique du « Bromus Erectus » dans les pelouses sèches de la Bourgogne méridionale. Ann. Sci. et litt. de Franche-Comté.

RICHARDS L.A. (1941). — A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. Soil Sci. **51**, 377-386.

—— (1942). — Soil moisture tensiometer materials and construction. Soil Sci. **53**, 241-248.

—— (1947). — Diagnosis and Improvement of Saline and Akali soils. U.S. Regional Salinity Labor.

—— (1948). — Pressure-plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. Soil Sci. **66**, 105-110.

—— (1949). — Methods of measuring soil moisture tension. Soil Sci. **68**, 95-112.
—— et Wadleigh C.H. (1952). — Soil water and plant growth. In soil Physical conditions and Plant growth. Academic Press. N.-Y.
—— et Weaver L.R. (1943). — Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. Soil Sci. **56**, 331-339.
—— (1944). — Moisture Retention by some irrigated soils as related to soil-moisture tension. J. agr. Res. **69** (6), 215.
—— et Weeks L. (1953). — Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurement on soil columns. Soil Sci. Soc. Am. Pro. **17**, 206-220.
Riedel C.E. (1960). — La référence Climat-Sol-Plante. Bull. Techn. Inf. **150**, 361-368.
Ringelmann M. et Bourdelle J. (1931). — Mesure des densités apparentes des terres. Ann. agron. 495-504.
Robinson J.B.D. (1957). — The critical relationships between sol moisture content in the region of wilting point and the mineralisation of naturel soil nitrogen. J. Agr. Sci. **49**, 100-105.
Rode A.A. (1956). — Catégories et formes de l'eau du sol et les propriétés hydrologiques de sols. VI° congr. Sc. du sol 1, **20** (B), 135-147, Paris.
Roe H.B. (1950). — Moisture requirements in agriculture Farm irrigation. Mc Graw Hill. Toronto.
Rolley P. (1953). — Irrigations, Ballières, Paris.
Roussel L. (1961). — L'aération du sol intervient-elle dans la régénération de l'épicéa? Bull. Soc. forest. de Franche-Comté, XXXI, **6**, 296-298.
Ruhland W. (1956). — Handbuch der Pflanzenphysiologie, Band III, Pflanze und Wasser. Springer, Berlin.
Russell M.B. (1949). — Methods of measuring soil structure and aeration. Soil Sci. **68** (1), 25.
—— (1959). — Water and its relation to soils and crops. Ady. in agron. XI. 1-122.
—— et Richards L.A. (1938). — The determination of soil moisture Energy Relations by Centrifugation. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. **3**, 65-69.
Salter P.J. et Haworth F. (1961). — The available water capacity of a sandy loam soil. J. Soil Sci. G.B. **12** (2), 326-334.
Segeberg H. (1958). — Gewächshausversuche zur Bestimmung des Welkepunktes humoser Sandböden Z. Pfternähz. Düng. **82** (2-3), 151-164.
Schofield R.K. (1935). — The pF of the water in soil Trans. 3d Intern. Congr. Soil Sci. **2**, 37-48.
Slatyer R.O. (1957). — The significance of the permanent wilting percentage in studies of plant and soil water relations. Bot. Rev. **23** (10), 585-636.
—— (1958). — Avaibility of Water to plants. Act. coll. Canberra (Zone aride) XI. UNESCO, 159-163.
Stanhill G. (1957). — The effect of differences in soil moisture status on plant growth. A review and analysis of soil moisture regime experiments. Soil Sci. **84**, 205-210.
Steward F.C. Edit.) (1959). — Plant physiology (2), Plants in relation to water and solutes. Academic Press. N.Y.
Stocker O. (1929). — Das Wasserdefizit von gefässpflanzen in verschiedenen Klimazonen. Planta **7**, 382-387.
—— (1959). — Die Dürreresistenz. Handbuch der Pflanzenphysiologie III. Rühland. 696-741.
—— (1961). — Les effets morphologiques et physiol. du manque d'eau sur les plantes. C. r. recherches sur la zone aride XV. UNESCO, 69-113.
Stone E., Went F.W. et Young C.L. (1950). — Water absorption from the atmosphere by plants growing in dry soil. Science **111**, 546.
Studer R. (1961). — Méthode de détermination des réserves hydriques des sols. Ann. agron. **12** (6), 599-608.
— et Blanchet R. (1963). — Irrigation en région tempérée à influence océanique et interaction entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. C. r. Acad. agric. France, **49** (5), 339-348.
—— et Blaskiewicz J. (1961). — Méthode de détermination des réserves hydriques des sols. Ann. agron. Fr. **12** (6), 599-608.
Taylor S.A. (1961). — Water relations of field crops. Act. Coll. de Madrid, XVI (zone aride) UNESCO, 303-308.

—— et Furr J.R. (1937). — Use of Soil-moisture and fruit-growth records for checking irrigation practices in citrus orchards, U.S. Dept. agric. cir. 426.

Tronchet J. Mme (1959). — Colloque sur le Bilan d'eau des plantes vasculaires. Discussion, Bull. Soc. franç. Physiol. végét. **5** (3).

—— (1961). — Contribution à l'étude de la croissance et des mouvements de la plantule de Cuscuta Gronovii. Ann. Sc. Univ. Besançon (Thèse).

Tschapek M. (1957). — The hydrophility of the soil. Simp. Internaz. Agrochim. Pisa Atti. I, 151-162.

Vaadia Y., Raney C. et Hagan M. (1961). — Plant water deficits and physiological processer. Ann. rev. Plant. physiol. **12**, 265-292.

—— et Waisel Y. (1962). — Absorption d'eau par les organes aériens des plantes. Physiol. Plant. **16** (1), 44-51.

Veihmeyer F.J. (1956). — Soil moisture. Handh. der Pflanzenphysiol. Ruhland, III, 64-123.

—— et Hendrickson A.H. (1928). — Soil moisture at permanent wilting of plants. Plant physiol. **3**, 355-357.

—— et —— (1931). — The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. Soil Sci. **32**, 181-193.

—— et —— (1948). — The permanent wilting percentage as reference for the measurement of soil moisture. Trans. Amer. geophys. Un. **29**, 887-896.

—— et —— (1949). — Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. Soil Sci. **68**, 75-94.

—— et —— (1950). — Soil moisture in relation to plant growth. Ann. Rew. of Plant Physiol. *I*, 285.

—— Oserkowsky J. et Tester K.B. (1928). — Some factors affecting the moisture equivalent of soils. I Internat. Congr. of Soil Sci. **1**, 512-534.

Vernet A. (1957). — Organisation et premiers résultats du centre d'étude de l'eau de Tunis. Ann. serv. bot. et agron. de Tunisie **30**, 73-116.

Vomocil J.A. (1957). — Measurement of soil bulk density and penetrability : a review of methods. Adv. agron. U.S.A. **9**, 159-175.

Wadleigh C.H. (1946). — The integrated soil moisture stress upon a root system in a large container of saline soil. Soil Sci. **61**, 225-238.

—— et Gauch H.G. (1948). — Rate of leaf elongation as affected by the intensity of the total soil moisture stress. Plant. Physiol. **23**, 485-495.

Walter H. (1955). — The water economy and the hydratur of plants. Ann. Rew. Plant. Physiol. **6**, 239-252.

Wallace A.M. et Stout N.B. (1962). — Transpiration rates under controlled environment : species humidity and available water as variables. Ohio J. Sci. **62** (1), 18-26.

Wiegner G. (1926). — Anleitung zum quantitativen agrikulturchemischen Praktikum. Berlin.

Wiersma D. et Veihmeyer F.J. (1954). — Absence of water exudation from roots of plants grown in an atmosphere of high humidity. Soil Sci. **78**, 33.

Wikle J.S., Davidson H. et Erickson E.A. (1961). — Soil moisture studies with container grown plants. Mich. agric. Expt. Sta. Quart. Bull. **44** (1), 125-128.

Zamfirescu N. (1931). — Recherches sur l'absorption de l'eau par les organes aériens des plantes. Ann. agron. **5**, 752.

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté :

Etude des conditions thermiques de la vernalisation sur les semences et les pousses

VU ET APPROUVÉ :

Besançon, le 6 mai 1964.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

R. JACQUEMAIN

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Besançon, le 6 mai 1964.

Le Recteur,

H. GAUTHIER

Jury ..... MM. A. TRONCHET ..... *Président,*
A. QUANTIN .....
Mlle G. LEGRAND ..... *Examinateurs.*
M. L. DESHUSSES .....

Imp. P. CARRERE — RODEZ